



VHODNÁ PLNIVA A PŘÍSDY DO LICÍCH MATERIÁLŮ PRO VÝROBU PROTOTYPŮ LITÍM VE VAKUU

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T030 – Výrobní systémy
Autor práce: **Bc. Vojtěch Příbyl**
Vedoucí práce: Ing. Petr Zelený, Ph.D.





APPROPRIATE FILLERS AND ADDITIVES TO CASTING MATERIALS FOR PROTOTYPING CASTING IN VACUUM

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301T030 – Manufacturing Systems
Author: **Bc. Vojtěch Příbyl**
Supervisor: Ing. Petr Zelený, Ph.D.





ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Bc. Vojtěch P Ř I B Y L**
studijní program **N2301 Strojní inženýrství**
obor **2301T030 Výrobní systémy**
zaměření **pružné výrobní systémy pro strojírenskou výrobu**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Vhodná plniva a přísady do licích materiálů pro výrobu prototypů litím ve vakuu

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

Hlavním cílem této práce je vypracovat technologii, vhodný postup při přidávání plniv do materiálů pro lití ve vakuu pro zlepšení mechanických vlastností odlévaných dílů. Zjistit jaké materiály a plniva lze využít. Provést praktické otestování odlévání plněných materiálů a výsledných vlastností odlitků.

Doporučené metody pro vypracování:

1. Seznámit se s technologií lití ve vakuu.
2. Provést rešerši možných plniv a jejich aplikace.
3. Definovat vliv na mechanické vlastnosti odlitků přidáním různého množství a druhů plniv.
4. Provést pokusná odlití dílů pro mechanické zkoušky.
5. Vyhodnotit výsledky experimentů a stanovit vhodný postup při přidávání plniv.



Forma zpracování diplomové práce:

Rozsah průvodní zprávy cca 60 stran textu včetně příloh.

Diplomová práce včetně příloh bude v elektronické formě přiložena na CD (či DVD) ke každému tištěnému svazku diplomové práce.

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

[1] NOORANI, R.: Rapid Prototyping: principles and applications. John Wiley & Sons, 2006, ISBN 0-471-73001-7

[2] JACOBS, P. F.: Stereolithography and other RP&M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling. ASME Press, 1996, ISBN 0-87263-467-1

[3] GIBSON, I. - ROSEN, D. W. - STUCKER, B.: Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer, 2010, ISBN 978-1-4419-1119-3

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

Ing. Jiří Šafka, Ph.D.



Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

V Liberci dne 15. března 2014

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

TÉMA: VHODNÁ PLNIVA A PŘÍSAKY DO LICÍCH MATERIÁLŮ PRO VÝROBU PROTOTYPŮ LITÍM VE VAKUU

ABSTRAKT: Práce shrnuje informace o používaných přísadách do polymerů, jejich vliv na vlastnosti materiálu, porovnání mechanických vlastností vláknenných plniv, způsob přidávání plniv do licích materiálů, zhodnocení vlivu přidávaných plniv.

KLÍČOVÁ SLOVA: vakuové lití, plniva, přísady do polymerů, kompozit, vlákna

THEME: APPROPRIATE FILLERS AND ADDITIVES TO CASTING MATERIALS FOR PROTOTYPING CASTING IN VACUUM

ABSTRACT: The thesis summarizes information about additives used in polymers, their influence on material properties, comparing the mechanical properties of fibrous fillers, method of adding fillers to casting materials, evaluation of the influence of added fillers.

KEYWORDS: vacuum casting, fillers, polymer additives, composite, fibers

Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů

Počet stran : 63
Počet příloh : 3
Počet obrázků : 49
Počet tabulek : 6
Počet modelů
nebo jiných příloh: 0

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své práce, panu Ing. Petru Zelenému, Ph.D. za pomoc a čas strávený v laboratoři rapid prototypingu při přípravě zkušebních vzorků a za cenné rady při tvoření této práce. Také se společně s panem Ing. Jiřím Šafkou, Ph.D. zasloužil o sehnání několika druhů plniv. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Seidlovi z oddělení tváření kovů a plastů za použitá plniva a za umožnění provedení tahových zkoušek.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	- 10 -
1 Úvod.....	- 11 -
2 Cíl diplomové práce.....	- 11 -
3 Rapid prototyping a rapid tooling.....	- 11 -
4 Plniva a další přísady	- 12 -
4.1 Částicová plniva (prášková).....	- 12 -
4.2 Vláknitá plniva	- 16 -
4.2.1 Skelná vlákna	- 18 -
4.2.2 Čedičová vlákna	- 18 -
4.2.3 Polymerní vlákna.....	- 19 -
4.2.4 Uhlíková vlákna	- 21 -
4.2.5 Přírodní vlákna	- 23 -
4.2.6 Porovnání vláken.....	- 23 -
4.3 Další přísady do polymerů	- 25 -
4.3.1 Zpracovatelské přísady.....	- 26 -
4.3.2 Antidegradanty	- 27 -
4.3.3 Síťovací prostředky	- 27 -
4.3.4 Přísady ovlivňující další fyzikální vlastnosti.....	- 28 -
4.3.5 Zvláštní přísady	- 28 -
5 Vláknina v kompozitu.....	- 29 -
5.1 Vláknina v matrici.....	- 30 -
5.2 Orientace vláken.....	- 30 -
5.3 Obsah vláken a plniv	- 31 -
5.4 Technika přidávání plniv do reaktivních pryskyřic	- 33 -
5.4.1 Manuální.....	- 33 -
5.4.2 Částečně automatizované	- 34 -
5.4.3 Plně automatizované.....	- 35 -
5.4.4 Kontinuální.....	- 35 -

5.4.5	Speciální technologie	- 35 -
5.5	Recyklace plastů s plnivý	- 36 -
6	Lití ve vakuu	- 37 -
6.1	Odlévací vakuová komora.....	- 37 -
6.2	Vhodné materiály pro lití ve vakuu s plnivý	- 39 -
6.3	Odlévaný materiál	- 39 -
7	Lití zkušebních vzorků.....	- 40 -
7.1	Tvar odlitku.....	- 40 -
7.2	Forma pro odlitek.....	- 41 -
7.3	Postup lití	- 43 -
7.4	Materiál bez plniv	- 45 -
7.5	Materiál s plnivý z krátkých vláken	- 45 -
7.5.1	Sekaná skelná vlákna.....	- 47 -
7.5.2	Vlákna z juty	- 48 -
7.5.3	Kokosová vlákna	- 49 -
7.6	Materiál s plnivý z dlouhých vláken	- 50 -
7.6.1	Skelné prameny	- 50 -
7.6.2	Konopí.....	- 52 -
7.7	Porovnání použitých plniv	- 52 -
8	Zkoušení mechanických vlastností	- 54 -
8.1	Zkouška tahem	- 54 -
8.2	Průběh zkoušky	- 55 -
8.3	Porovnání vzorků	- 56 -
9	Závěr	- 60 -
	Seznam použité literatury	- 61 -
	Seznam příloh	- 63 -

Seznam zkratek a symbolů

3D – trojrozměrný

Al_2O_3 – oxid hlinitý

$\text{Al}(\text{OH})_3$ – hydroxid hlinitý

CaCO_3 – uhličitan vápenatý

E-modul – modul pružnosti

hm. % – hmotnostní procenta

KVS – katedra výrobních systémů

MgO – oxid hořečnatý

$\text{Mg}(\text{OH})_3$ – trihydrát oxidu hlinitého

MPIA – meta-aramidy

PA – polyamid

PAN – polyakrylonitril

PBO - poly-para-fenylenebisoxazol

PE – polyethylen

PP – polypropylen

PPTA – para-aramidy

PS – polystyren

PTFE – polytetrafluorethylen

PVAL – polyvinylalkohol

PVC – polyvinylchlorid

SiC – karbid křemíku (karborundum)

SiO_2 – oxid křemičitý (křemen, křemenný písek, silika)

STL – formát souboru vhodný pro 3D tiskárny

UHMW PE – polyethylenová vlákna

UV – ultrafialové

φ – objemový podíl vláken

ψ – hmotnostní podíl vláken

ρ_f – hustota vlákna

ρ_m – hustota matrice

1 Úvod

V dnešní době se klade velký důraz na rychlost a celkovou efektivitu výroby. Konkurence je čím dál silnější a tak se stále vymýšlí nové postupy, které jsou rychlejší, levnější a tedy konkurence schopné.

Hledají se alternativní materiály k materiálům, z kterých se dnes vyrábí nejrůznější výrobky. Důvodem může být snaha o snížení výsledné ceny produktu, ale často také snaha o odlehčení nebo zpevnění materiálu při zachování dalších vlastností, které jsou od výrobku z daného materiálu požadovány. Z těchto a dalších důvodů se v praxi kombinují různé materiály a vylepšují rozličnými přísadami, které mají za následek zlepšení požadovaných vlastností.

2 Cíl diplomové práce

Cílem této práce je zjistit, jakým nejvhodnějším způsobem lze přidávat různá plniva při odlévání materiálu, které probíhá ve vakuové komoře. Stanovit jaká plniva a další přísady se dají k tomuto účelu použít a jaké jsou jejich hlavní přednosti. Dále je zapotřebí určit do jaké míry ovlivňují daná plniva zejména mechanické vlastnosti materiálu a jaké množství se dá úspěšně použít. Z práce by mělo být také patrné, které materiály jsou pro vakuové lití s plnivem vhodné.

3 Rapid prototyping a rapid tooling

Termínem rapid prototyping se označuje rychlý vývoj prototypu. Jedná se o moderní způsob vyvíjení nejrůznějších výrobků, který šetří čas a peníze. Potřebná doba od prvotního vývoje produktu až po uvedení na trh se výrazně zkracuje. Do rapid prototypingu řadíme všechny metody spojené s 3D tiskem, kdy je vyráběná součást přímo vytisknuta z připraveného 3D modelu uloženého ve formátu STL.

Rapid tooling využívá spojení metody rapid prototyping s konvenčními postupy výroby. Řadí se sem lití se ztraceným modelem nebo vakuové lití. Jako model pro odlitek se zde používá právě výsledného produktu jedné z metod rapid prototypingu. Uvádí se, že Rapid tooling zrychluje výrobu produktu až na jednu pětinu času, který by byl potřeba při výrobě konvenčním způsobem.

4 Plniva a další přísady

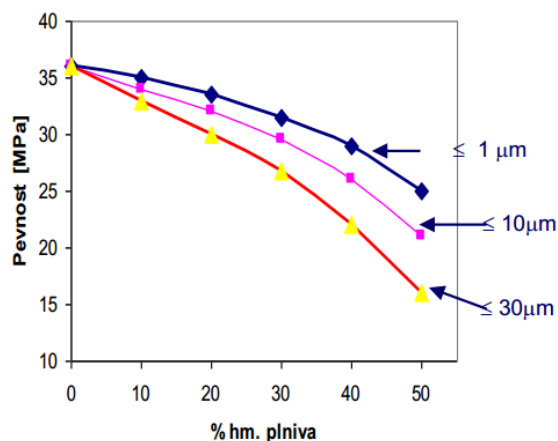
Přísady do polymerů se dávají z nejrůznějších příčin. Hlavním důvodem může být zlepšení vlastností základního materiálu po stránce mechanických, optických či stabilizačních vůči vnějším vlivům apod.

Mechanické vlastnosti se zlepšují plnivy, která jsou ve formě částic (prášků) nebo vláken. Vláknitá plniva zlepšují zejména pevnost a tuhost (E-modul) materiálu. Částicová plniva mohou pozitivně ovlivňovat hlavně tuhost materiálu. Dále mohou vhodná plniva ovlivnit další vlastnosti výsledného polymerního materiálu jako např. tepelnou odolnost, otěruvzdornost, tepelnou nebo elektrickou vodivost nebo mohou sloužit ke ztužení pryskyřice při nanášení do svislé polohy (tzv. tixotropní plniva). Často se také používají z důvodu ušetření základního materiálu pro snížení ceny.

Použitím vhodného plniva vzniká materiál, kterému se říká kompozit. Kompozitem se rozumí materiál, který se skládá ze dvou nebo více chemicky rozdílných složek. Jednou je výztuž, která je tvrdší, tužší a pevnější složka a druhou část tvoří tzv. matrice, která plní funkci pojiva. Matrice bývá poddajnější než výztuž. Ve strojírenství mají největší význam tzv. mikrokompozitní materiály, které jsou tvořeny plnivem mající příčnou velikost přibližně v rozsahu 1 až 100 μm . [9]

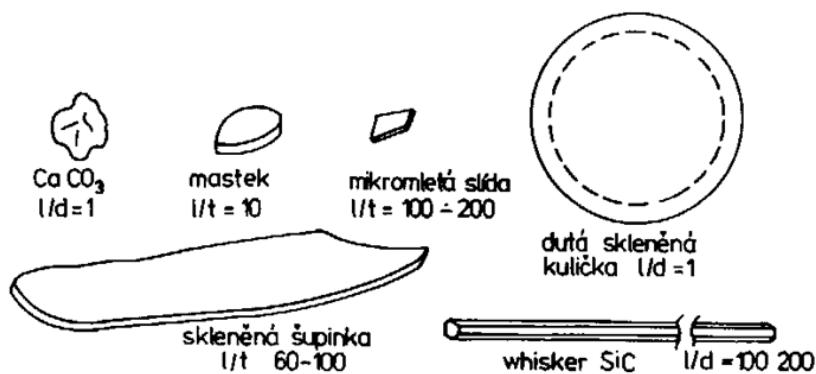
4.1 Částicová plniva (prášková)

Jedná se o plniva, která jsou ve formě částic sférického (izometrického) nebo destičkového (anizometrického) tvaru. Částice sférického tvaru by neměly být příliš velké, aby negativně neovlivňovaly pevnost, ale ani příliš jemné kvůli dobrému rozptýlení částic v materiálu. Nejvhodnější jsou částice, které mají velikost v rozsahu 1 až 10 μm . Vliv velikosti sférických částic plniva na pevnost kompozitu je vidět na obr. 1. Příkladem sférického tvaru je uhličitan vápenatý (křída) nebo dolomit. Částice anizometrického tvaru (destičky, jehlice, disky) mohou materiál kromě vyztužení dokonce i podstatně zpevnit. Částice destičkového tvaru mají např. mastek, slída, kaolín nebo hydroxid hořečnatý, jehlicovitý tvar představuje minerál wollastonit. Jako vyztužující částicová plniva se dají použít také kovové nebo dřevěné piliny, hobliny apod. Velikostní poměr největšího rozměru částice k nejmenšímu rozměru udává tzv. aspektivní (štíhlostní) poměr. [9]

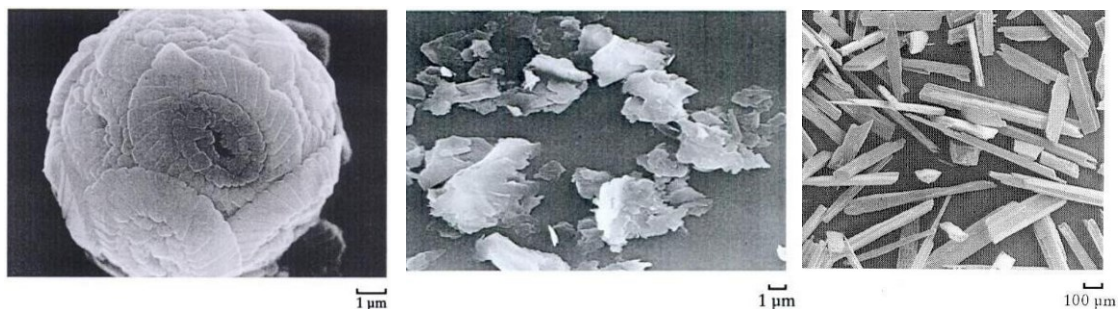


Obr. 1 Vliv velikosti sférických částic na pevnost PP kompozitu [8]

Největší aspektivní poměr (délka ku průměru až 200) mají krátká vlákna a krátké vláknové monokrystaly, tzv. whiskery. Whiskery mají oproti krátkým vláknům výhodu, že při malých příčných rozměrech (0,1 až 1 μm) a vysoké tahové pevnosti nedochází k jejich lámání při přípravě kompozitu, kde jsou vystaveny ohybovému namáhání. Na obr. 2 a 3 se nachází vyobrazení a velikosti aspektivních poměrů některých částicových plniv. Fyzikální a chemické vlastnosti vybraných částicových plniv se nacházejí v tab. 1. [9]



Obr. 2 Tvary a rozměry částicových plniv [13]



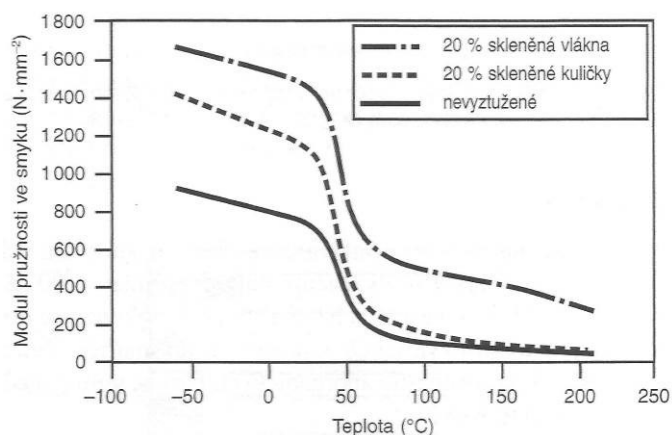
Obr. 3 Příklady sférických, destičkových a jehlicových typů částicových plniv (zleva: křída, mastek, wollastonit) [11, 12]

Plnivo	Tvar	Hustota [g/cm ³]	Chemické složení	Barva	Aspektivní poměr
Křída	sférický	2,7	CaCO ₃	bílá	1
Dolomit	sférický	2,85	CaCO ₃ .MgCO ₃	bílá	1
Mastek	destičkový	2,7	Mg(Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	šedo-bílá	< 5
Slída	destičkový	2,76 - 2,88	KM(AlSi ₂ O ₁₀)(OH) ₂	bílo-hnědá	< 60
Wollastonit	vláknitý	2,9	CaSiO ₂	bílá	< 20
Kaolín	destičkový	2,6	Al ₂ O ₃ .2SiO ₂ .2H ₂ O	bílo-hnědá	< 5
Baryt	destičkový	4,5	BaSO ₃	bílá	< 5
Saze	sférický	1,7 - 1,9	C(83-99%)	černá	1
ATH	různý	2,4	Al(OH) ₃	bílá	-
Silika	sférický	2,0	SiO ₂	bílá	1

Tab. 1 Fyzikální a chemické charakteristiky vybraných částicových plniv [8]

Nevyztužující prášková plniva, jako je moučka z břidlice, kaolínu, křídý a dalších levných materiálů, se většinou používají hlavně pro snížení ceny materiálu. Práškové kovy zvyšují tepelnou vodivost. Obsah nevyztužujících plniv v kompozitu bývá až 70 %. [7]

Přidáním skleněných kuliček, minerálních plniv a skleněných vláken se docílí zvýšení modulu pružnosti a tím tuhosti vyztužovaného plastu, zatímco pro zvýšení pevnosti v tahu je vhodná pouze vláknitá výztuž. Skleněné nebo kovové kuličky zvyšují také rozměrovou stabilitu, tepelnou vodivost a odolnost proti rázům. Příklad změny modulu pružnosti přidáním skleněných kuliček, respektive skleněných vláken se nachází na obr. 4. [3, 7]



Obr. 4 Změna modulu pružnosti při obsahu 20 % skleněných kuliček (resp. vláken) v závislosti na teplotě [3]

Silikáty (křemičitany) s geometrií vloček a ještě lépe ve tvaru vláken podstatně zlepšují tvarovou stálost nad teplotou skelného přechodu, tj. tuhost při zvýšené teplotě. Částicová plniva sférického tvaru (křída, skleněné kuličky) nejsou schopna efektivně přejímat zatížení z matrice, a proto se tuhost za zvýšené teploty nezlepší úměrným způsobem jako u vláknenného typu částic. Vliv 40 hm. % některých částicových plniv na mechanické vlastnosti kompozitu s matricí z PA 6,6 je v tab. 2. [3, 7]

Vlastnost	Původní PA	Křída	Mastek	Slída	Skleněné kuličky	Wollastonit
Hustota [g/cm^3]	1,14	1,48	1,49	1,50	1,46	1,51
Pevnost v tahu [MPa]	81,4	72,2	61,8	105,2	67,4	72,2
Tažnost [%]	5,0	2,9	2	2,7	3,2	3,0
E – modul [GPa]	2,83	4,55	6,38	10,62	4,24	5,45
Ráz. houževnatost [J/m^2]	2,67	26,7	26,7	32	21,3	32
Tepelná odolnost [°C]	77	199	229	238	210	221
Rozměrová stabilita [mm/mm]	0,018	0,012	0,008	0,003	0,011	0,009

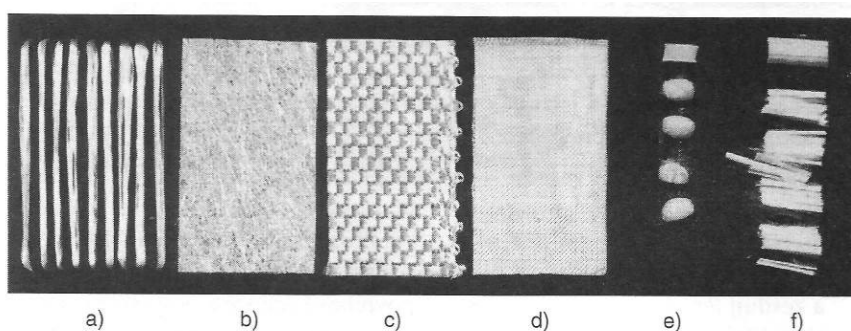
Tab. 2 Vliv 40 hm. % částicových plniv na vlastnosti PA 6,6. [8]

Pro zlepšení kluzných vlastností se kombinují částice bronzů s částicemi grafitu, sulfidu molybdenu nebo polytetrafluoretylenu (zkráceně PTFE). Přidáním sazí, zejména u polyolefinů (PE, PP), se dosáhne zvýšení odolnosti proti UV záření. Saze se používají hlavně jako gumárenské plnivo, kde zvyšují tuhost, pevnost, odolnost proti oděru a botnání, ale zhoršují zpracovatelnost kaučukových směsí. U hořlavých polymerů se snižuje hořlavost vysokým obsahem plniv z anorganických částic. U polyolefinů se

dosahuje dokonce samozhášivých vlastností přidáním částic $Mg(OH)_3$ nebo $Al(OH)_3$, protože se z těchto hydroxidů uvolňuje při hoření chemicky vázaná voda. Pro výrobu nehořlavých kompozitů je potřeba až 60 hm. % těchto částic. [3, 8, 9, 14]

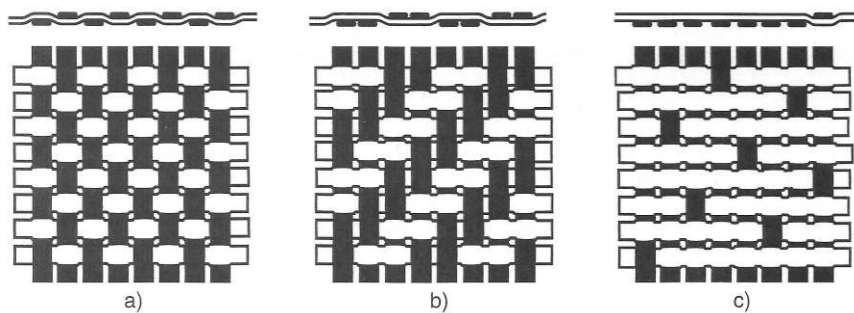
4.2 Vláknitá plniva

Jednotlivá vlákna se používají jen zřídka. Jejich hlavní využití se nachází v kompozitních materiálech, kde slouží zejména k vyztužení a zpevnění materiálu. Konečné vlastnosti kompozitu jsou značně ovlivněny použitým druhem, množstvím a orientací vláken. Pro všechny druhy vláken platí, že v praxi se vláknitá plniva aplikují ve formě nasekaných vláken, rovingu (pramenec), rohoží, pletenin nebo tkanin (viz obr. 5). [3]

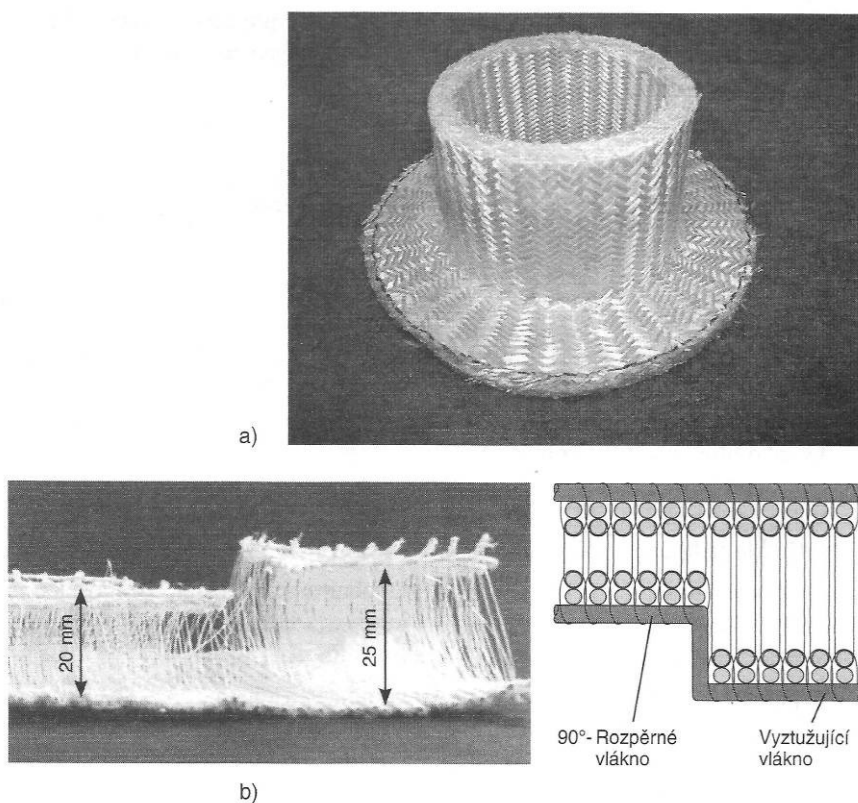


Obr. 5 Druhy používaných vláken – a) roving (pramenec), b) rohož, c) tkanina z pramenců, d) tkanina z vláken, e) krátká vlákna (délky asi 0,22 mm), f) dlouhá vlákna (délky asi 5 mm) [3]

Tkaniny díky vláknům či pramenům uložených pravoúhle v útku a osnově působí vyztužujícím účinkem ve dvou směrech. Způsob křížení vláken v osnově udává typ použité vazby, která může být plátnová, keprová nebo atlasová (saténová). Vyobrazení možných vazeb tkaniny se nachází na obr. 6. Při požadavcích na přesnost položení výztuže v složitém trojrozměrném prvku se dají použít trojrozměrné tkaniny. V důsledku orientace vláken v těchto tkaninách není jejich pevnost tak velká, jako v případě použití jednosměrné tkaniny. Řešením může být použití pletenin, které mohou být přizpůsobeny tvaru a namáhání součástí. Pleteniny umožňují zabudování jednosměrně vyztužených pásů. Vzhledem k velmi malé řasitelnosti a cílené orientaci jejich struktur může být pevnost i tuhost velmi vysoká. Příklad 3D pletené výztuže je na obr. 7. [3]



Obr. 6 Vazby tkaniny – a) plátnová, b) keprová, c) atlasová [3]



Obr. 7 a) 3D výztuž příruby, b) 3D tkanina [3]

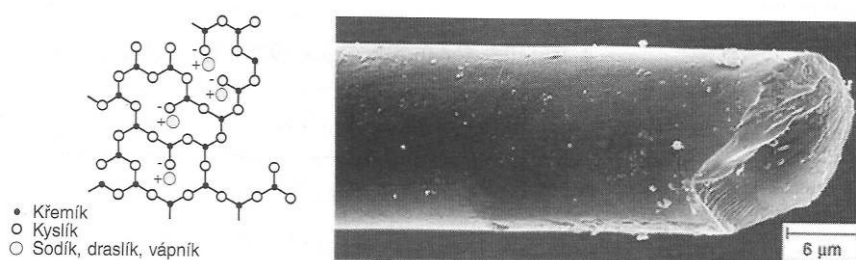
K vyztužování polymerních materiálů se používají různé druhy vláken. Nejčastěji se pracuje se skelnými, aramidovými nebo uhlíkovými vlákny. Čím dál častěji nalézají uplatnění i vlákna přírodní. Keramická a kovová vlákna se v polymerní matrici nepoužívají, protože ve srovnání s ostatními vlákny mají nejenom vyšší cenu, ale také by díky své větší hustotě zvyšovala hmotnost výsledného lehkého plastového výrobku. [9]

4.2.1 Skelná vlákna

Vyrábějí se s pravidelným kruhovým průřezem o průměru 3,5 až 24 μm v několika variantách. Nejčastěji jako vlákna typu E, někdy označovaná jako elektrická, protože jsou vynikajícím elektrickým izolantem. Dnes zaujímají jako standardní typ téměř 90 % trhu. Hodnota meze pevnosti v tahu se pohybuje na 2400 MPa a modul pružnosti v tahu mají 73000 MPa. Vlákna vyrobená ze skloviny s vyšším obsahem SiO_2 , MgO a Al_2O_3 se označují v USA jako vlákna typu S (strength), případně v Evropě R (resistance) nebo v japonsku T. Na rozdíl od předešlého typu mají asi o 40 až 70 % vyšší pevnost. Dále se vyrábí tzv. C-sklovina s vysokou odolností proti chemicky agresivním látkám a kyselinám, nebo bezboritá C-sklovina označovaná jako ECR sklovina. Pro vyztužení betonu se používají AR vlákna, která jsou vysoce odolná alkáliím. [3]

Existují ještě další typy vláken používané pro speciální aplikace, jako jsou např. vlákna ze skloviny L, která mají vyšší obsah olova a jsou tak vhodná pro použití v lékařství k odstínění rentgenového záření. [6]

Na rozdíl od uhlíkových a aramidových vláken jsou skelná vlákna izotropní (vlastnosti v podélném i příčném směru jsou totožné). Vlákna jsou nehořlavá. Povrch skleněných vláken je hydrofilní, váže tedy na sebe vlhkost z okolního vzduchu, která způsobuje horší spojení matrice s vlákny. Vlákna je tedy zapotřebí před použitím vysušet nebo uchovávat v nepropustném obalu. Schéma chemického složení skelného vlákna a samotné vlákno zobrazené pod elektronovým mikroskopem je na obr. 8.



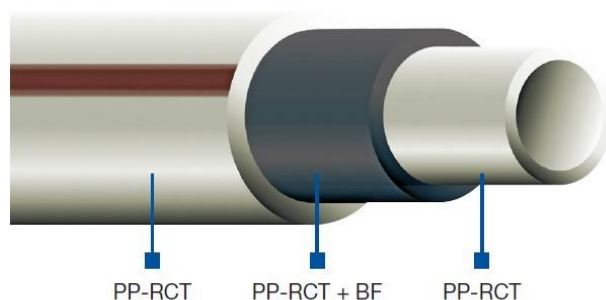
Obr. 8 Skelné vlákno a jeho chemické složení [3]

4.2.2 Čedičová vlákna

Čedičová vlákna (basalt fiber - FB), někdy označovaná jako bazaltová, jsou vlákna minerálního typu. Pochází ze sopečné horniny s názvem čedič (bazalt). Vyrábějí se stejným způsobem jako skleněná vlákna. Vlákna jsou svými vlastnostmi podobná

vláknům vyrobených ze skloviny typu S. Oproti nim mají ovšem nižší cenu, která činí asi jen 60 % ceny skleněných vláken typu S. Jejich hlavní výhodou je dobrá chemická a výborná tepelná odolnost. [6]

Tato vlákna se používají např. při výrobě PP trubek určených univerzálně pro vedení studené a teplé vody a vysokoteplotního vytápění. V porovnání s PP trubkami plněnými skelnými vlákny došlo u trubek plněných čedičovými vlákny v kombinaci s novou generací polypropylenu ke zvýšení tlakové odolnosti při vysokých teplotách až o 50 %, vyššímu průtočnému množství o 20 % a snížení hmotnosti o 15 %. Díky těmto vláknům mají PP trubky plněné skelnými nebo čedičovými vlákny 3 krát nižší tepelnou roztažnost. Oproti skelnému vláknu má čedičové vlákno o 8 % vyšší hustotu a o pětinu vyšší pevnost v tahu. Schéma PP trubky plněné čedičovými vlákny se nachází na obr. 9. [16]

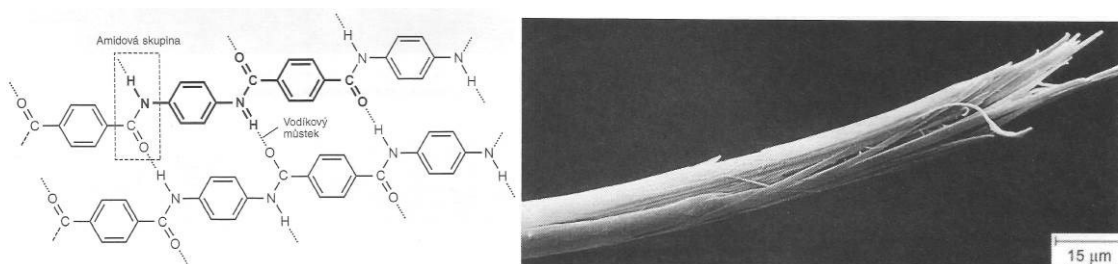


Obr. 9 Schéma PP trubky plněné čedičovými vlákny [16]

4.2.3 Polymerní vlákna

Pro kompozitní materiály musejí mít polymerní vlákna alespoň srovnatelnou pevnost a tuhost se skleněnými vlákny. Nejpoužívanější jsou vlákna aramidová, která jsou pro kompozity nejvhodnější. [9]

Aramidová vlákna jsou založena na bázi lineárních organických polymerů s kovalentními vazbami orientovanými podle osy vlákna. Aramid tvoří tuhý hlavní řetězec (aromatická jádra) a silné vazby mezi hlavními řetězci (vodíkové můstky). Označení aramid vznikl ze zkrácení spojení aromatický polyamid. Chemická struktura aramidu a aramidové vlákno se silným rozštěpením v lomu je na obr. 10. [3]



Obr. 10 Aramidové vlákno a jeho chemické složení [3]

Rozeznávají se dvě skupiny – meta-aramidy (MPIA, termická odolnost a elektroizolační schopnosti) a para-aramidy (PPTA, významně vyšší pevnost v tahu a vyšší modul pružnosti). Nejznámější para-aramid se vyrábí pod obchodní značkou Kevlar®, vyznačující se velkou odolností proti abrazi a schopností se plasticky deformovat při působení síly ve směru kolmém na osu vlákna, čehož se využívá např. u neprůstřelných vest. [6]

Praktická pevnost v tahu aramidového vlákna o průměru 12 μm se pohybuje na hodnotě 3600 MPa a modul pružnosti E na 125000 MPa. V laminátu je využito až 70% jejich skutečné pevnosti a dokonce i více při tažné matici. Hlavními oblastmi, kde se nejčastěji využívají, jsou náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích, výztuž pro pneumatiky, balistické aplikace nebo světlovodné kabely. Dále pro aplikace, kde je požadována vysoká houževnatost a odolnost proti oděru, tedy v oblasti, jakou je výroba lodí, závodních automobilů, letadel a podobně. [3, 4]

Aramidová vlákna mají záporný součinitel tepelné roztažnosti ve směru vláken, což znamená, že čím je teplota vyšší, tím větší je důsledkem entropie smrštění vláken. V porovnání s ostatními vyztužujícími vlákny mají nízkou hmotnost, ale zároveň vysokou pevnost v tahu. Oproti skelným vláknům je aramidové vlákno silně anizotropní s citlivostí na tlakové namáhání. Aramidové kompozity se hodí hlavně pro lehké konstrukční prvky s převažujícím tahovým namáháním. [3]

Vzhledem k hydrofilní povaze vláken (absorbují vlhkost až do 7 %), která ovlivňuje dokonce i samotnou pevnost vláken, je zapotřebí před jejich použitím vlákna vysušit, případně skladovat v suchu podobně jako skelná vlákna. Vlákna nejsou příliš odolná vysokým teplotám, ve formě kompozitu odolávají teplotě až 300 °C, neroztaví se však, a proto se využívají pro protipožární ochranné obleky. Dále jsou citlivá na UV záření, které oslabuje jejich pevnost. [3]

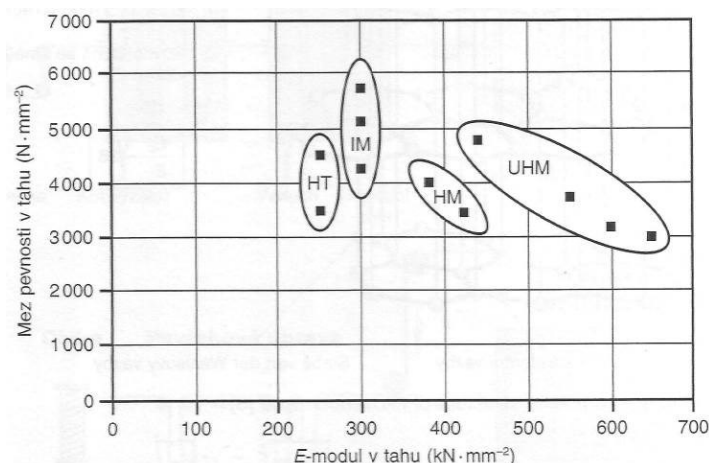
Jedním z dalších typů polymerních vláken využívaných pro polymerní matrice jsou polyetylenová vlákna z lineárního UHMW PE. Nevýhodou těchto vláken je malá teplota tání krystalů (140 °C), ale kompozity s těmito vlákny mají velmi vysoké hodnoty měrné pevnosti. [9]

Dalším možným typem výztuže jsou vlákna z lineárních aromatických kopolyesterů (pod mezinárodní zkratkou LCP). Tato vlákna se vyrábějí např. pod značkou Ekonol[®], kdy dosahují při hustotě 1,3 g/cm³ modulu pružnosti v tahu 138 GPa a hodnoty pevnosti v tahu 3500 MPa. [9]

Ze všech polymerních vláken mají největší tepelnou odolnost vlákna z poly-para-fenylenbenzobisoxazolu (PBO). Prodávají se pod obchodním názvem Zylon[®]. Tato vlákna nehoří, v ohni nemění svůj tvar (nesmršťují se) a mají velmi dobrou chemickou odolnost (neabsorbují vlhkost jako v případě aramidových vláken). Pevnost v tahu a modul pružnosti mají zhruba dvojnásobný oproti špičkovým typům aramidových vláken. [9]

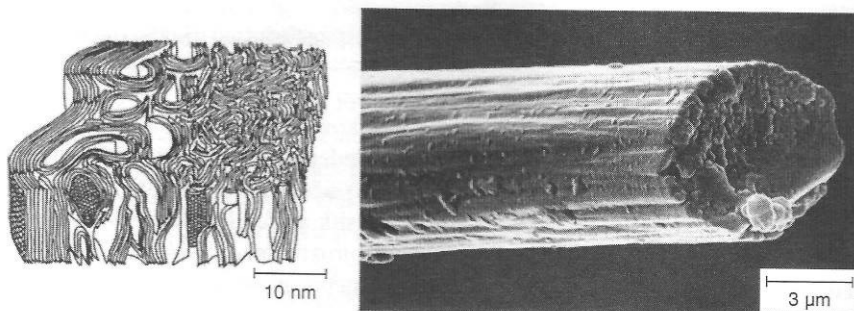
4.2.4 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyznačují extrémně vysokou pevností, ale nízkou tažností. Tyto vlákna se vyrábějí z organických surovin, které je zapotřebí nejprve karbonizovat. Vlákna se vyrábějí ze tří možných surovin. První surovinou je celulóza, z které ovšem mají vlákna nepříliš dokonalou strukturu. Hodí se spíše pro použití jako izolační materiál pro vysoké teploty. Za standardní vlákna jsou považována vlákna vyrobená z polyakrylonitrilu (PAN). Poslední surovinou je smola, ze které se vyrábí vlákna s vysokým modulem pružnosti (vlákna HM) nebo s vysokou pevností (vlákna HT). Pevnostní hodnoty jednotlivých typů uhlíkových vláken jsou vyobrazeny na obr. 11. Při výrobě uhlíkových vláken je potřeba velmi vysokých teplot dosahujících hodnot 2500 až 3000 °C podle způsobu výroby. Dosažení těchto teplot je příčinou vysoké ceny vláken. [3]



Obr. 11 Mechanické hodnoty jednotlivých typů uhlíkových vláken, HT – standardní, IM – středně-, HM – vysoko-, UHM - ultravysokomodulová [3]

Vlákná jsou tvořena z více než 90 % uhlíku, asi 7 % dusíku, kyslíku a vodíku. Jejich velikost bývá o průměru 5 až 10 μm . Podobně jako aramidová vlákna jsou uhlíková vlákna silně anizotropní a ve směru osy vlákna mají záporný součinitel tepelné roztažnosti. Mají dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. Jsou hořlavá, ale rychlost hoření je velmi pomalá. Oproti ostatním materiálům (např. hliníku, oceli) jsou lamináty vyztuženy uhlíkovými vlákny vysoce odolné proti dlouhodobému dynamickému namáhání. Na obr. 12 se nachází vyobrazení uhlíkového vlákna. [3]



Obr. 12 Uhlíkové vlákno a jeho mikrostruktura [3]

Při zpracování vláken se provádí apretace směsí na bázi epoxidové pryskyřice. Apretace je konečná úprava povrchu vláken, která slouží ke změknutí vláken a současně k lepšímu propojení vláken s matricí. Při zpracování se jinak za normálních okolností lehce lámou. Tato ochranná vrstva se však při dlouhodobějším skladování vytvrzuje, důsledkem čehož ztrácí vlákna svou ohebnost. [3]

4.2.5 Přírodní vlákna

Jako vyztužující plniva z přírodních vláken mají největší smysl vlákna zejména na bázi celulózy – sisal (textilní vlákno, které se získává z listů rostliny agáve sisalové), len, konopí, bavlna, juta, ramie, vlákna kokosu nebo banánovníku. Případně se používá i vlna z ovčí či srst z koz. Nalézají uplatnění jako levnější alternativa skleněných vláken. [3]

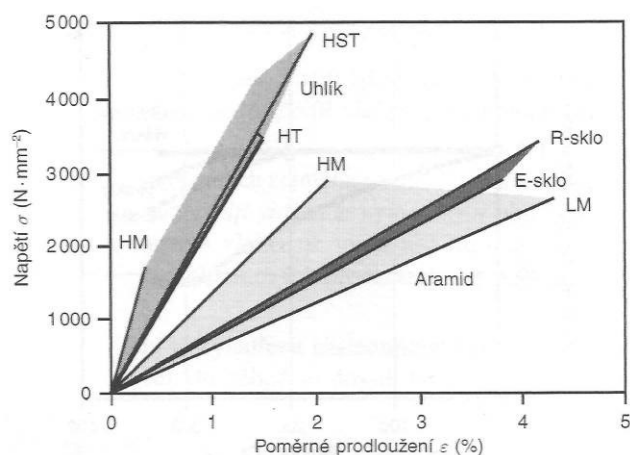
Výhodou přírodních vláken oproti ostatním je odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách. Další výhodou je nízká hmotnost, malá abrazivita při mechanickém opracování a možná likvidace spalováním. Nevýhodami je omezená délka vláken a závislost jejich vlastností na podmínkách jejich růstu. Omezení použití vláken závisí také na teplotě zpracování (odolnost do 200 °C). Vlákna jsou citlivá na vlhkost a je zde možná změna vlastností v důsledku biologického napadení. Porovnání některých přírodních vláken oproti skleněným je v tab. 3. [3]

Vlastnosti \ Vlákno	Sklo	Konopí	Len	Juta	Sisal
<i>E</i> -modul ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	75 000	70 000	30 000	55 000	20 000
Mez pevnosti v tahu ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	3 500	600	750	550	600
Tažnost (%)	4	1,6	2,0	2,0	2,0
Hustota ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2,54	1,45	1,48	≈ 1,4	1,45

Tab. 3 Mechanické vlastnosti některých přírodních vláken v porovnání se skleněnými
[3]

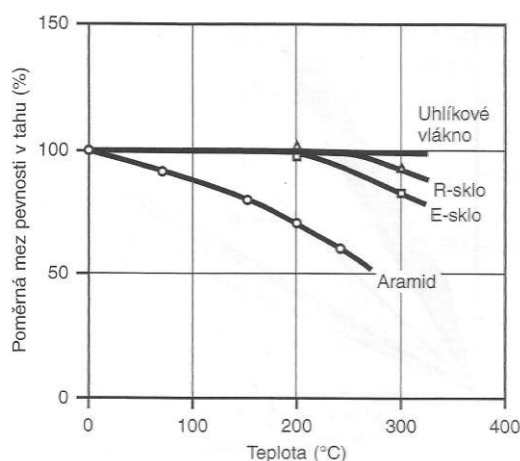
4.2.6 Porovnání vláken

Mechanické vlastnosti jednotlivých vláken lze porovnat z deformačního chování jednosměrné vyztužených laminátů o stejném obsahu vláken, které jsou namáhány tahovým napětím ve směru vláken, viz obr. 13. [3]



Obr. 13 Mechanické vlastnosti jednosměrně vyztuženého laminátu při tahové zkoušce [3]

Důležitá je také teplota, v které se bude výrobek vyztužený vlákny používat. Hlavně u aramidových vláken je změna pevnosti s rostoucí teplotou znát. V tomto ohledu vycházejí nejlépe uhlíková vlákna, viz obr. 14.



Obr. 14 Poměrný pokles v tahu v závislosti na teplotě [3]

Změna teploty má vliv také na roztažnosti prvků, z kterých se kompozit skládá. Materiál polymerní matrice a skleněná vlákna se ve všech směrech se stoupající teplotou roztahují, zatímco vlákna uhlíková a aramidová se roztahují pouze kolmo na směr vlákna. Ve směru vlákna se naopak tyto materiály mírně smršťují. Koeficienty teplotní roztažnosti jsou v tab. 4. Koeficient uhlíkových vláken ve směru vláken je roven téměř nule, což znamená, že kompozit při velkém objemovém podílu těchto vláken nemá prakticky žádné teplotní roztahení. [3]

Materiál		Součinitel teplotní roztažnosti (10^{-6} K^{-1})	
		α_{lf}	α_{lf}
Matrice		70 až 200	
Vlákno	skleněné	4,6	4,6
	uhlíkové	-0,1 až -1,5	10 až 15
	aramidové	-1 až -4	40 až 60

Tab. 4 Koeficienty roztažnosti různých typů vláken [3]

Schopnost tlumení při dynamickém namáhání vychází nejlépe pro aramidová vlákna. Uvádí se, že je až 6 krát vyšší než u skleněných a dokonce 9 krát vyšší ve srovnání s uhlíkovými kompozity. Uhlíkové kompozity nejlépe odolávají dlouhodobému dynamickému namáhání. Ve srovnání se skelnými či aramidovými vlákny, která ztrácí v kyselém i alkalickém prostředí svou pevnost, jsou uhlíková vlákna inertní. Mechanické vlastnosti vybraných vláken jsou uvedeny v tab. 5. Nalezená cenová hladina je určena pro vlákna ve formě rovingu a je závislá na právě prodávaném typu rovingu. [3]

Typ vlákna	Hustota [g/cm ³]	Pevnost v tahu [MPa]	E – modul [MPa]	Tažnost [%]	Cena bez DPH [Kč/ kg]
E – sklo	2,60	2 400	73 000	3,0	80
S (R) – sklo	2,53	3 500	86 000	4,1	-
Čedičová	2,75	4 840	89 000	3,15	-
Uhlíková HT	1,78	3 600	240 000	1,5	900
Aramid HM	1,45	3 000	130 000	2,1	1 140
Kokosová	1,15	131 - 175	4,0 – 6,0	15 - 40	-

Tab. 5 Porovnání některých mechanických vlastností a ceny rovingu u vybraných vláken [3, 4, 14]

4.3 Další přísady do polymerů

Při výrobě plastů se používá spousta dalších přísad kromě plniv. Používání samotných čistých polymerů nepřichází prakticky v úvahu. Každá přísada ovlivňuje více či méně výsledné vlastnosti konečného výrobku. Koncentrace přísad se v polymerních směsích stanovuje jako počet hmotnostních dílů přísady připadajících na 100 hmotnostních dílů polymeru. Označuje se jako dsp (v případě kaučukových směsí dsk, případně anglicky phr – parts of hundred of rubber). Přísady se rozdělují do následujících několika skupin. [14]

4.3.1 Zpracovatelské přísady

Jsou to přísady, které usnadňují nebo dokonce umožňují přípravu a zpracování polymerních materiálů.

Plastikační činidla (peptizátory) – jsou určeny k usnadnění plastikace kaučuku intenzivním hnětením. [14]

Maziva – slouží k usnadnění zpracování obtížně zpracovatelných polymerů jako je PVC, PS, PTFE. V současnosti se používají i jako přísada do kaučuků. Zlepšují ale i mnohé další vlastnosti plastů jako je např. vzhled povrchu, tepelná a světelná stabilita nebo odolnost vůči povětrnosti. Maziva mohou být s vnějším nebo vnitřním účinkem. S vnějším účinkem jsou málo rozpustné v polymeru, a proto vystupují na povrch, díky čemuž usnadňují vyjímání výrobku z formy. Maziva s vnitřním účinkem, které jsou dobře rozpustné v polymeru, snižují viskozitu taveniny a tím také do určité míry zmenšují množství vznikajícího tepla při zpracování polymerů. Maziva se přidávají v obsahu do 1 % a mohou to být např. vosky, stearáty zinku či vápníku, popřípadě méně používané oleje a tuky. [7, 14]

Separční činidla – usnadňují vyjímání výrobků z forem. Používají se ve formě vnějšího maziva, silikonového oleje nebo PTFE disperze (ve formě nátěrů či nástřiků tvářecích ploch, odolnost do 300 °C). Nevýhodou jsou následné problémy při případném potiskování nebo pokovování povrchu výrobků. Proto se pak používá separčních fólií z celofánu nebo PVAL. [14]

Změkčovadla – jsou to málo těkavé organické látky, které dávají polymerům ohebnost, tvárnost, vláčnost a snižují teplotu skelného přechodu a viskozitu taveniny. Princip změkčovadel je zvyšování tzv. vnitřní pohyblivosti makromolekulárních řetězců polymeru. Přísada musí být pro polymer rozpouštědlem, protože jen tak má schopnost pronikat mezi makromolekulární řetězce a oddalovat je.

Tepelné stabilizátory – jsou určeny pro tvarování za tepla a tváření polymerů, jejichž teploty měknutí a rozkladu leží v úzkém rozmezí. Mají za úkol zamezit odštěpování chlorovodíku (způsobuje korozi), zamezit vzniku barevných struktur v důsledku tepelných destrukcí a případně je rozrušovat.

4.3.2 Antidegradanty

Jsou to přísady, které dlouhodobě chrání plastové výrobky před vnějšími vlivy během jejich používání. Vnějšími vlivy může být sluneční záření, atmosférický kyslík, ozón nebo tepelná energie. Podle toho rozdělujeme antioxidanty do několika skupin.

Světelné stabilizátory (absorbéry UV záření) – jsou to přísady, které ze světelného spektra absorbují UV záření, které způsobuje degradaci plastů. Proto tuto část záření o vlnových délkách 300 až 400 nm nesmějí propouštět, ale absorbovat. Principem těchto absorbérů je přeměna UV záření na záření energeticky chudší, tedy pro polymery neškodné.

Antioxidanty – přísady, které mají chránit plastové výrobky před působením vzdušného kyslíku. Ten při pokojové teplotě způsobuje degradaci plastů již asi po 10 letech. Degradaci podléhají hlavně nenasycené polymery. V jejich makromolekulárních řetězcích vznikají hydroperoxidové skupiny $-O-O-H$, které se štěpí na radikály a zahajují řetězovou oxidační reakci vedoucí k degradaci polymeru. Antioxidanty zabraňují řetězovému průběhu oxidace.

Antiozonanty – ozon napadá pouze pryž, která je vyrobená z nenasycených kaučuků. V porovnání s ostatními degradačními faktory, má ozon na pryž největší degradační účinek.

4.3.3 Síťovací prostředky

Jsou to látky, které se účastní síťovacích reakcí, tedy spojování lineárních nebo rozvětvených makromolekulárních řetězců příčnými vazbami do struktury prostorové sítě.

Síťovací činidla – je to nejdůležitější složka, která je zakladatelem příčných vazeb a bez které síťování nemůže proběhnout. U kaučuků jsou jimi vulkanizační činidla, které způsobí vulkanizaci. K tomuto účelu se používá přírodní mletá síra. Tvrdidla se používají pro reaktoplasty, kde způsobují vytvrzování. Používají se polyaminy a organické peroxidy. Termoplasty se síťují organickými peroxidy nebo zářením o vysoké energii.

Aktivátory síťování – jsou to přísady, které aktivují síťovací reakci, tj. zmenšují její aktivační energii. Následkem toho se zvyšuje účinnost síťování, které má menší nároky na teplotu vzhledem k rychlosti síťování.

Urychlovače síťování – slouží k urychlení síťování, protože reakce síťovacího činidla s polymerem bývá v praxi někdy velmi pomalá. Urychlovače sirné vulkanizace u kaučuků zkrátí potřebnou dobu pro síťování z hodin na minuty. Urychlovače pro reaktoplasty zkracují hlavně dobu vytvrzování.

4.3.4 Přísady ovlivňující další fyzikální vlastnosti

Nadouvadla – přísady, které vytvářejí ve výrobku uzavřené nebo otevřené póry. Princip spočívá v rozkladu přísady při teplotě zpracování polymerní směsi, kdy rozklad doprovází plynné produkty (nejčastěji dusík nebo kyslík). Nadouvadla jsou k dispozici v anorganické nebo organické podobě. Anorganická jsou sice levná, ale obtížně se dispergují a při delším skladování se samovolně rozkládají. Příkladem anorganického nadouvadla je uhličitan amonný. Výhodnější jsou organická nadouvadla, která jsou v polymerech dobře rozpustná a poskytují jemnější póry. Nadouvadla se přidávají k základnímu materiálu pouze v malém množství (0,5 až 2 %) a vytvářejí lehčené plasty. [7, 14]

Pigmenty – jsou to barevné prášky, které nejsou rozpustné v polymerech. Pigmenty se dělí na organické a anorganické. K barvení plastů jsou používána zejména anorganická barviva, která jsou levná, ale nedávají dost živé odstíny (např. křída, sádrovec, grafit, zinková a titanová běloba). Důležitá je tvrdost částic těchto barviv, protože mohou mít abrazivní účinek vůči sklem vyztuženým plastům. Tvrdé pigmenty mohou skleněná vlákna poškrábat a poškodit. [3, 14]

Opticky zjasňující látky – jsou to látky, které absorbují část UV záření (340 až 400 nm). Pohlcenou energii vyzařují při osvětlování ve formě fluorescence (430 až 460 nm) a tím se vyvolává v lidském oku dojem, že předmět má jasnější barvu. Světelné stabilizátory zjasňující účinek ruší. Nejčastěji se těmito přísadami odstraňuje zažloutlost polymerů. [14]

4.3.5 Zvláštní přísady

Přidávají se pouze do některých směsí polymerů a dávají jim specifické vlastnosti.

Antistatické prostředky – antistatika jsou látky silně hydrofilní nebo s elektricky vodivou strukturou, kdy dochází ke zvýšení elektrické vodivosti polymeru. Antistatika se hodí spíše pro termoplasty, u pryží zastávají tuto funkci saze.

Přísady snižující hořlavost (retardéry hoření, zhášedla) – přísady, které se při zvýšených teplotách rozkládají. Při rozkladu uvolňují plynné látky, které buď tvoří pěnový, tepelně izolující polštář nebo přímo plamen zhasí. Často se kombinují i s plnivem snižující hořlavost (slída, kaolín, křemičitany, grafit, síran hořečnatý).

Brusné prostředky – polymery se dají použít jako pojivo pro brusivo. Např. karborundum brousek se skládá z reaktoplastové pryskyřice a karbidu křemíku.

Faktisy – aditiva, které se přidávají do kaučukových směsí pro vylepšení hladkosti povrchu při vytlačování. Oprýžovaný textil dostává příjemný omak, pryž činí vláčnou a měkkou.

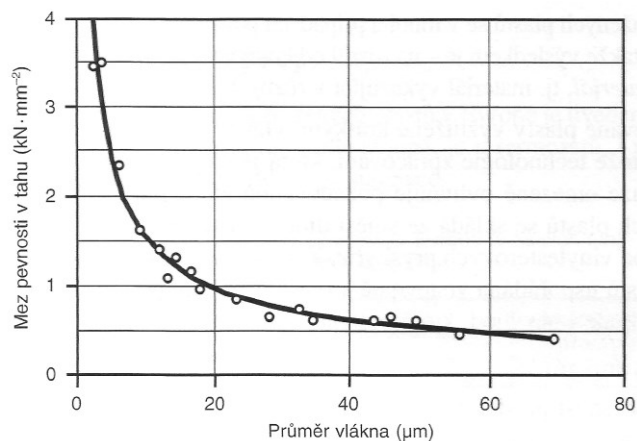
Adhezní prostředky – fungují jako chemické smáčedlo v případech špatného spojování plniva s polymerem. Jedná se o chemické přísady, jejichž hlavním znakem je přítomnost dvou typů reaktivních skupin. Umožňují vytvoření dostatečně pevné vazby mezi povrchovými reaktivními skupinami anorganického plniva a organického polymeru. Používají se organofunkční silany a organotitanáty. [14]

5 Vlákná v kompozitu

Vložením vyztužujícího prvku do materiálu se zvýší pevnost a tuhost materiálu, která je podmíněna těmito pravidly:

- Vlákná musí být pevnější než matrice
- Materiál vláken musí mít vyšší tuhost než matrice
- Matrice se nesmí porušit dříve než vlákno

Většina vláken se vyrábí asi o průměru 14 μm , protože menší vlákna už způsobují karcinogenní účinky při vdechování do plic. Vliv pevnosti vlákna vzhledem k jeho průměru se nachází na obr. 15. Kompozitní materiály dosahují lepších vlastností, než odpovídá průměr vlastností jednotlivých složek, ze kterých se skládají. Tomuto jevu se říká synergický efekt. [3, 9]



Obr. 15 Vliv průměru vlákna na mez pevnosti v tahu [3]

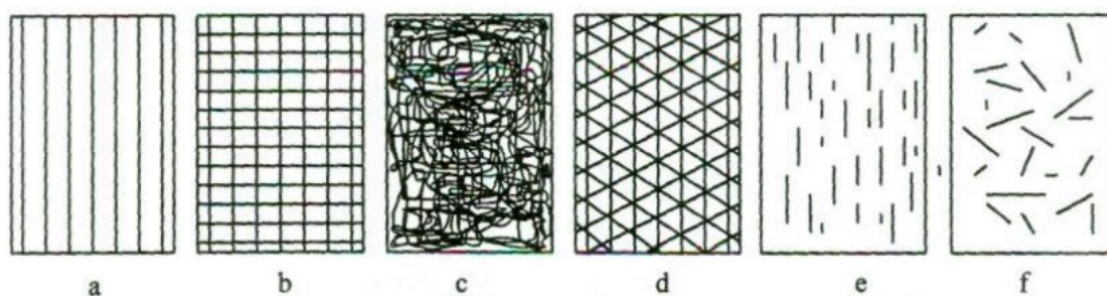
5.1 Vlákná v matrici

Úlohou matrice je zajištění geometrické polohy vláken, převedení sil z matrice na vlákno a mezi jednotlivými vlákny. Matrice má také funkci ochrany, kdy kryje vlákno proti vnějším vlivům okolí. Další důležitou vlastností pro vytvoření kvalitního kompozitu je zajištění dobré adheze s vlákny. Ta se ovlivňuje vhodnou apretací povrchu vláken pro daný materiál. Dobrá adheze vytvořená mezi vláknem a matricí podává mnohem lepší mechanické a tepelné vlastnosti kompozitu než výrobky z neupravených vláken. Vhodnou viskozitou matrice se zajistí úplné smočení vlákna bez bublin. [3]

Matrice polymerního kompozitu může být z reaktoplastu (termosetu) nebo z termoplastu. Reaktoplasty mají při teplotě zpracování mnohem nižší viskozitu, která se pohybuje řádově ve stovkách $\text{mPa} \cdot \text{s}$, zatímco u termoplastů dosahuje hodnot 10^3 až 10^5 $\text{mPa} \cdot \text{s}$. Díky tomu se používají více reaktoplasty jako kompozitní materiály, protože se jednodušeji zpracovávají, snadněji smáčejí a prosycují vlákna. [3]

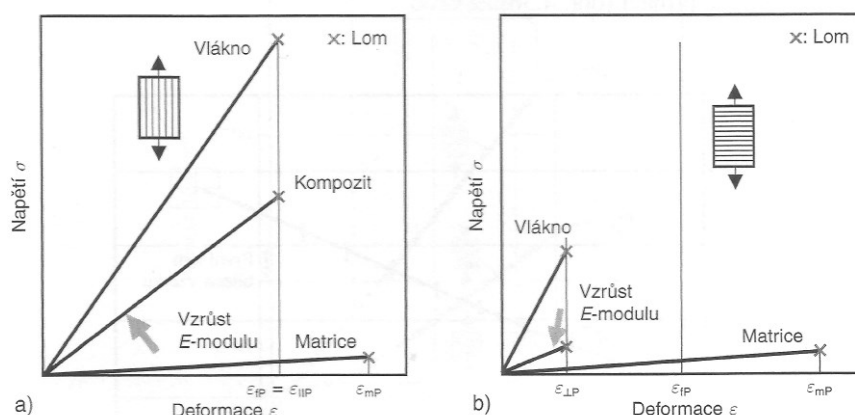
5.2 Orientace vláken

Podle typu vlákna a způsobu výroby kompozitu může být orientace vláken v matrici různá. Při použití kontinuálních vláken může být výztuž orientována jednosměrně, dvouose, víceose nebo nahodile uspořádána. V případě použití krátkých vláken nebo whiskerů mohou být vlákna orientována přednostně nebo nahodile. Příklady možného uspořádání v kompozitech je vyobrazeno na obr. 16. [9]



Obr. 16 Vláknové uspořádání: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výtzuž z kontinuálních vláken, e) jednosměrně orientovaná krátká vlákna, f) nahodile orientovaná krátká vlákna. [9]

Způsob orientace vláken má velký účinek na pevnost a tuhost výsledného výrobku. Vyrobená součást s vláknovými plnivý vydrží vždy větší zatížení ve směru vláken než kolmo na ně. Působí-li síla ve směru kolmo na vlákna, pevnost materiálu se naopak snižuje, viz obr. 17. [3]



Obr. 17 Mechanické vlastnosti jednosměrně vyztuženého laminátu a) zatížení ve směru vláken, b) zatížení kolmo na vlákna [3]

5.3 Obsah vláken a plniv

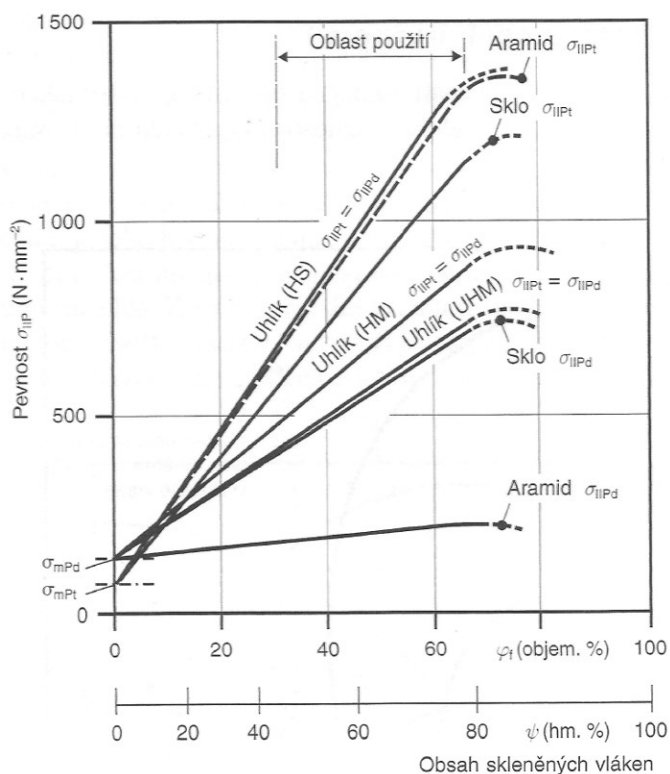
Podle různých požadavků na kompozitní materiál se přidává také různý objem plniv do polymeru. Pro zjednodušení měření potřebného množství vláken se používá dávkování v hmotnostních procentech (hm. %) a udává se jako hmotnostní podíl vláken ψ . Objemový podíl vláken ϕ se uplatňuje při určování veličin vztažených na plochu, jako je napětí nebo E-modul. V důsledku nižší hustoty matrice oproti vláknům, je hodnota vyjádřená v objemových procentech nižší, než v hmotnostních procentech.

Souvislost mezi těmito podíly udává rovnice (1), kde ρ_f je hustota vlákna a ρ_m je hustota matrice. [3]

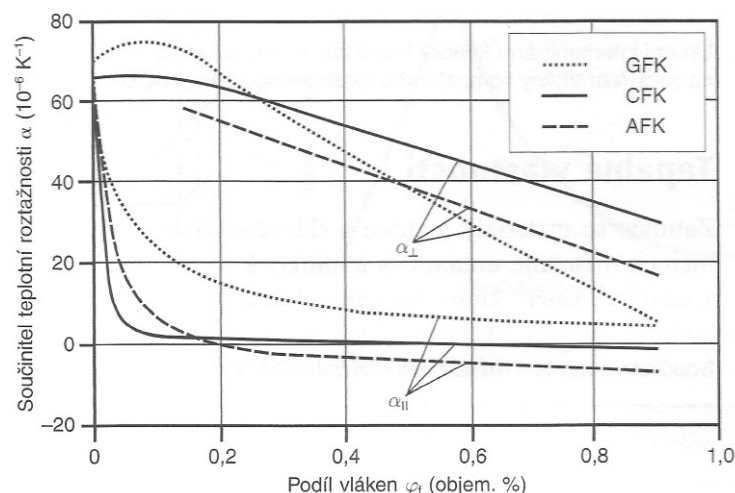
$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1 - \psi}{\psi} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_m}} \quad (1)$$

Pro vyztužování plastů se nejčastěji volí objem plniva asi v rozmezí 30 až 65 %, ale i menší objem vede k vylepšení požadovaných vlastností. Někde se udává maximálně 50 %. Pro správnou funkci vyztužujícího plniva je hlavně důležité, aby všechna vyztužující vlákna byla dokonale pokryta pojivem. [3, 7]

Obsah vláken v matrici má zejména vliv na pevnost v tahu ve směru vláken, jak je znázorněno na obr. 18. Dále má obsah vláken vliv na tepelné vlastnosti kompozitu. Velikost teplotního součinitele roztažnosti kompozitu klesá s rostoucím obsahem vláken. V příčném směru na vlákna dochází při malém podílu vláken k zvláštnosti, kdy součinitel teplotní roztažnosti mírně stoupá. Toto je způsobeno tím, že matrice je při změně teploty ve směru vláken namáhána tlakem, což při relativně vysoké hodnotě Poissonova čísla matrice způsobuje v tomto směru prodloužení. Vliv podílu vláken na součinitel teplotní roztažnosti je vidět na obr. 19. Podíl plniva může mít dle typu plniva vliv také na další vlastnosti jako je např. elektrická vodivost, houževnatost a další. [3]



Obr. 18 Pevnost vláken v závislosti na objemu vláken [3]



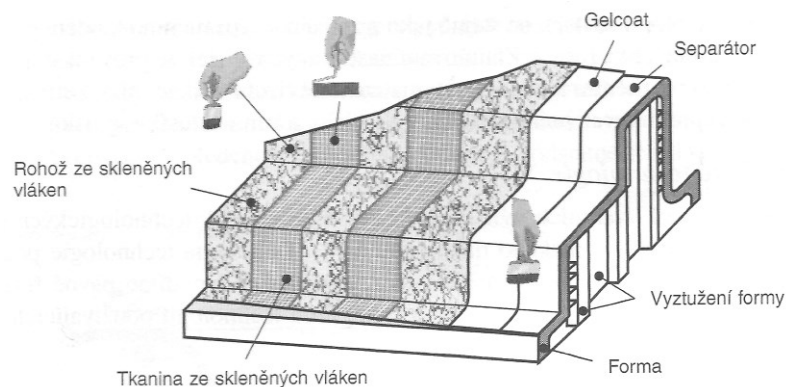
Obr 19 Vliv plniva na součinitel teplotní roztažnosti (GFK – skelná vlákna, CFK – uhlíková vlákna, AFK – aramidová vlákna) [3]

5.4 Technika přidávání plniv do reaktivních pryskyřic

Tato práce se zaměřuje na plniva vhodná do licích materiálů ve vakuu. U materiálů, které jsou při zpracování v tekutém stavu s nízkou viskozitou, se přidávání vyztužujících plniv provádí ručně, částečně automatizovaným nebo automatizovaným postupem. Výběr metody závisí i na použitém materiálu, protože reaktivní pryskyřice mohou mít různý průběh chemické reakce. [3]

5.4.1 Manuální

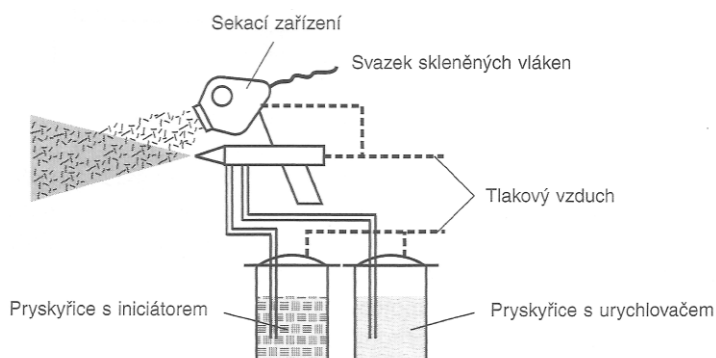
Nejjednodušší metoda, vhodná pro malosériovou výrobu a velkoplošné díly nebo prototypy. Metoda spočívá v nanesení tenké vrstvy pryskyřice na povrch formy, tzv. gelcoat. Následně se na tuto vrstvu položí skelná rohož a ručně se válečkem nanese vrstva pryskyřice. Než pryskyřice zatuhne, kladou se na povrch přířezy skleněné tkaniny pro kvalitnější povrch, které se prosycují pryskyřicí pomocí válečku. Tato metoda se nazývá kladení za mokra. Metoda je vyobrazena na obr. 20. Obsah výtzuže při použití skleněných rohoží se pohybuje kolem 35 hm. %, v případě skleněných tkanin dokonce až 45 hm. %. [3]



Obr. 20 Postup ručního kladení [3]

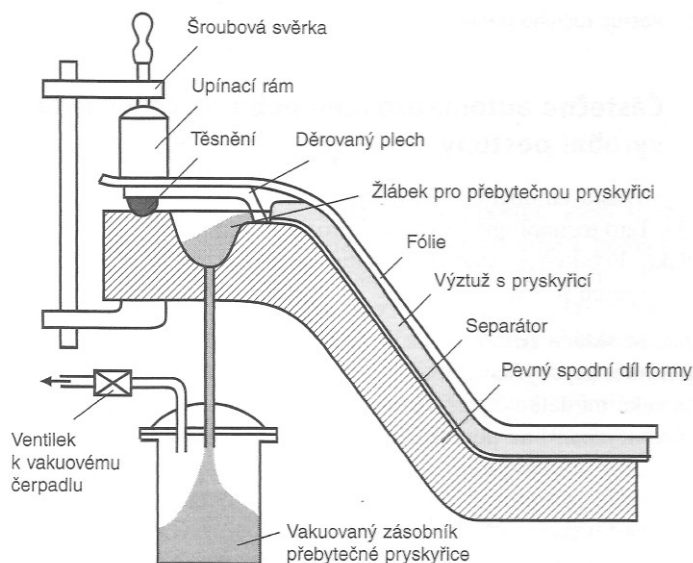
5.4.2 Částečně automatizované

Touto metodou je možno stříkat na povrch formy pryskyřici s tvrdidlem a vlákny najednou. Zařízení se skládá ze dvou nádob obsahující tvrdidlo a pryskyřici a ze sekacího zařízení, které přiváděné skelné vlákno seká na délky 20 až 50 mm. Postup metody je na obr. 21. [3]



Obr. 21 Schéma stříkacího zařízení [3]

Další možností jsou nízkotlakové technologie. Rozdělují se na technologie používající lisování pomocí vakuového vaku, vakuové dvoudílné formy, tlakového vaku, lisování v autoklávu a další technologie používající injektážní prosycování výztuže. Příklad použití nízkotlakové technologie používající jednodílnou formu se nalézá na obr. 22. [3]



Obr. 22 Technologie nízkotlakého lití [3]

5.4.3 Plně automatizované

Patří sem technologie lisování, které se dělí dle způsobu zpracování na lisování za studena, za tepla a tzv. mokré lisování. Tyto technologie jsou nejvhodnější pro velkosériovou výrobu. [3]

5.4.4 Kontinuální

Kontinuální technologií se vyrábějí nekonečné vyztužené profily. Patří sem metoda kontinuální laminace, která se používá pro ploché, příčně nebo podélně zvlněné nekonečné pásy s konstantním průřezem. Princip metody spočívá v použití nosné fólie s nanesenou pryskyřicí, na kterou přijde výztuž v podobě skleněné rohože, která se nakonec po nasycení pryskyřicí překryje další fólií. Profily o různém průřezu se vyrábí metodou tažení, tzv. pultruze. [3]

5.4.5 Speciální technologie

Mezi speciální technologie se řadí technologie navíjení, kterou se vyrábějí dutá tělesa symetrická k ose otáčení (např. roury, tlakové zásobníky, apod.). Pramence prosycené pryskyřicí se navíjí na trn podle předdefinovaného vzoru. Při navíjení se vzájemně spojují rotační pohyb trnu s dopředným a zpětným pohybem supportu obsahující pryskyřici na prosycování. Podobnou technologií je technologie oplétání, kde

se pomocí rotující hlavy oplétá nepohyblivé jádro vyztužujícími vlákny do struktury podobné tkanině. [3]

Odlišnou metodou je výroba velkých rotačně symetrických těles s vnějším hladkým povrchem. Vyztužuje se skleněnými vlákny, které se nanášejí předem ručně do dutiny formy nebo se rozstříkují přídavným zařízením. Vlivem vyšší hustoty vláken oproti pryskyřici, zůstávají vlákna na vnějším průměru. Takové roury jsou např. vhodné pro přepravu agresivních médií, protože skleněná vlákna ve vnější vrstvě jsou chráněna před korozi. [3]

5.5 Recyklace plastů s plnivem

Možnost recyklace kompozitů závisí na použitém typu plniva a matrice. Vytvrzené reaktoplastické matrice použité s dlouhými skleněnými vlákny již není možné přetvarovat nebo roztavit a je proto nutné materiál rozemlít na drť. Pro nový materiál se dá využít až 20 % recyklátu, který obsahuje několikacentimetrová vlákna, aniž by došlo k podstatnému zhoršení mechanických vlastností. Problémem je špatný povrch nového výrobku, který předurčuje použití na neviditelné vnitřní prvky. Směs získaná z rozemletých reaktoplastů s krátkými skelnými vlákny zhoršuje zatékací vlastnosti lisovací hmoty. Pro opětovné využití materiálů s termoplastickou matricí se dá kromě rozemletí termoplast s plnivem roztavit a přetvářet do nového tvaru, ale ani tak se nedosáhne vlastností nového materiálu. [3]

Další možností je získání vyztužujícího materiálu chemickou cestou, která je ovšem ekonomicky velmi náročná. Chemické zpracování se provádí pomocí hydrolýzy (rozklad materiálu matrice v prostředí vodní páry), hydrogenace (rozklad ve vodíkové atmosféře) a pomocí pyrolýzy (tepelný rozklad). Vlastnosti vláken se ovšem díky chemikáliím a teplotě také zhoršují. Rozkladné produkty matrice se dají touto cestou použít také pro novou výrobu. [3]

Pro použití recyklátu je vždy nutné snížit požadavky na materiál, protože již není možné získat materiál, který by odpovídal vlastnostmi původnímu. Každý nový recyklát zhoršuje vlastnosti, a proto je nutné pro co největší recyklovatelnost najít vhodnou škálu aplikací, pro které vlastnosti recyklátu ještě stačí. [3]

6 Lití ve vakuu

Při klasickém gravitačním lití bývá problém se zatékavostí odlévaného materiálu do formy. Další potíž tvoří vzduch, který je nasycen uvnitř tekutého materiálu. Tento vzduch zapříčiní, že výsledný odlitek obsahuje vzduchové bublinky, které mohou způsobit mechanické poškození v místě zeslabení vlivem této pórovitosti. Tyto problémy se nejlépe odstraňují za pomoci lití ve vakuu, tedy v prostoru bez vzduchu.

V laboratořích KVS se lití ve vakuu používá zejména jako navazující proces při výrobě dílů některou z metod rapid prototypingu. Výrobek vytištěn na 3D tiskárně funguje jako master model pro vakuové odlévání. Takto se za velice krátký čas může součást jednoduše reprodukovat nebo jen odlít z vhodnějšího materiálu.

6.1 Odlévací vakuová komora

K odlévání ve vakuu posloužila vakuová komora MK Mini, která se nachází v laboratořích rapid prototypingu spadajících pod katedru KVS. Tento typ vakuové komory je zvláště vhodný pro školicí střediska, univerzity nebo malé firmy. Ke komoře patří i dvě temperovací pece. Technické parametry vakuové komory MK Mini jsou uvedeny v tab. 6. [10]

Maximální hmotnost odlítka	1000 g
Maximální velikost formy	450 x 470 x 400 mm
Velikost zařízení	640 x 600 x 1000 mm
Průtok vzduchu	25 m ³ /hod
Vakuum	≤ 0,5 mbar
Elektrická síť	230 V/ 50 Hz
Příkon	0,9 kW
Hmotnost zařízení	250 kg

Tab. 6 Technické parametry MK Mini [10]

Vakuum zajišťuje vakuová pumpa, která se pro správnou činnost musí nejprve dostat do provozní teploty, což trvá asi 20 minut. Pro zajištění vakua je vybavena masivními skleněnými dvířky doléhajícími při zavření na těsnění. Díky průhlednému sklu, se přes dvířka dobře ovládá celý proces lití. Dvířka se nemusí nijak zajišťovat, protože je drží podtlak komory. Hodnotu vakua, která se nejčastěji pohybuje přibližně kolem -0,96 atmosférického tlaku, ukazuje manometr umístěný nad dvířky. Poblíž manometru se nachází hlavní ovládací prvky – červený hlavní bezpečnostní spínač, ovládání spouštění vakuové pumpy a ovládání rychlosti otáčení míchátko. Úplně vlevo

nahoře se nacházejí digitální stopky s možností stopování či nastavování odpočtu ve dvou označených časech. Toho se využívá, aby se vědělo, jak dlouho jednotlivé činnosti probíhají. Díky dvěma časům se dají stopovat časy dvou výrobků odlévaných po sobě.

V komoře se nachází kovový stůl s nastavitelnou polohou potřebné výšky. Nad stolem jsou dva kelímky pro odlévání. Do většího kelímku se umísťuje míchátko, které slouží k mísení jednotlivých složek. Při odlévání materiálů, které je potřeba zahřát jako je např. vosk, je možnost ohřátí v kovovém kelímku až na hodnotu 120 °C. Ovládání naklánění kelímků se nalézá na pravé straně komory v podobě dvou pák. Nad nimi je ventil pro ovládání vakua. V případě pootočení ventilu do střední polohy se zastaví odčerpávání vzduchu z komory a v komoře se drží nastavené vakuum. Aby se vakuová pumpa nepřetěžovala, odlehčí se jí pootočením nákrůžku na pumpě tak, aby přes malý otvor mohla přisávat okolní vzduch. Na obr. 23 je popsána vakuová komora MK Mini.



Obr. 23 Vakuová komora MK Mini

1. Digitální stopky
2. Hlavní bezpečnostní vypínač, zapínání vakuové pumpy, zapínání a řízení rychlosti otáček míchání
3. Ukazatel tlaku uvnitř komory
4. Ovládání ohřevu objímky pro kovový kelímek
5. Vakuová pumpa
6. Ventil pro ovládání vzduchu uvnitř komory
7. Ovládací páky kelímků
8. Dva kelímky uložené ve svých objímkách
9. Výškově polohovatelný stolek pro formu

6.2 Vhodné materiály pro lití ve vakuu s plniv

Materiál pro odlévání s plniv by měl být dostatečně tekutý. Jeho nízká viskozita pak zajistí dobré zatékání i s obsahem plniv, které materiál zahušťují. Dále by se mělo dbát na smáčivost, tedy jak dobře se materiál pojí s plnivem a jaké přísady popřípadě přidat pro lepší spojení.

Pro lití ve vakuu se používají materiály na bázi tvrditelné pryskyřice, vosků a voskových směsí nebo nízko tavitelné kovy. [5] Všechny tyto materiály jsou použitelné pro vhodná plniva, jen je potřeba dávat pozor na výběr a množství plniva, protože mají velký vliv na zatékavost odlévaného materiálu. Proto by se měl výběr plniva dělat také s ohledem na dobu možné zpracovatelnosti směsi.

6.3 Odlévání materiál

Jako odlévání materiál se použil dvoukomponentní polyuretan PR403 A+B. Je to tekutý lící polyuretanový systém s nízkou viskozitou, který je určen pro využití v oblasti rapid prototypingu.

Materiál vznikne po smíchání dvou složek, jedná se o polyol (složka A) a isokyanát (složka B), po jejichž smíšení dojde k chemické reakci a následnému vytvrzení. Samotné vytvrzení je závislé na teplotě, kdy při vyšší teplotě tuhne materiál rychleji. Pro správné vytvrzení se složky mísí v poměru A:B – 60:100 hmotnostních dílů. Váhu jednotlivých složek nebylo potřeba počítat, protože se určila z přiložené tabulky hmotnostních podílů pro různé váhové množství. Jako potřebné množství pro zkušební těleso stačila minimální hodnota, která je o velikosti 30 g polyuretanové směsi. Používané směsi jsou v lahvích vyobrazených na obr. 24.



Obr. 24 Používané složky pro polyuretan

Pevnost materiálu v tahu je výrobcem udávána 47 MPa, s použitím vhodného plniva, by se pevnost měla zvýšit, jak je jedním z cílů této práce. Hustota odlitku z polyuretanové směsi je jen $1,10 \text{ g/cm}^3$, což znamená, že v podstatě všechna vlákna (s výjimkou kokosového vlákna, které má hustotu srovnatelnou) jsou těžší a navýší tedy do určité míry samotnou hmotnost tělesa z polyuretanu.

7 Lití zkušebních vzorků

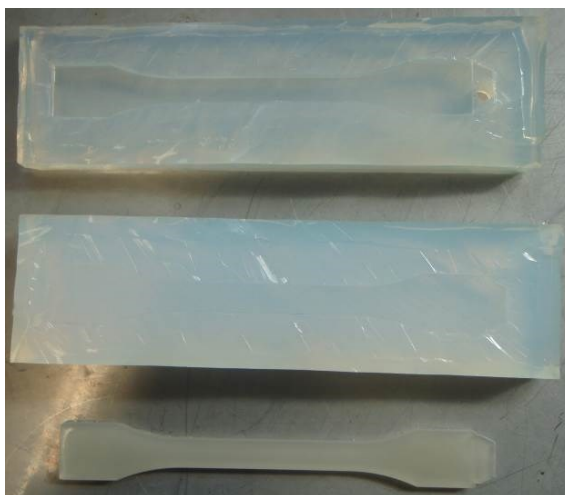
Od každého vzorku plněného odlišnými vlákny se odlilo pět zkušebních těles, aby se zamezilo případným odchylkám. Odchylky tvořily např. různé bublinky nebo nepravidelná orientace směru krátkých vláken a podobně. Většina plniv, ze kterých se vybíralo pro lití zkušebních těles, se získala z oddělení tváření kovů a plastů. Už dříve zkoušeli různé varianty vlákenných plniv pro výrobu plastů na vstřikovacím lisu, proto měli poměrně velký výběr vláken, zejména převažovala vlákna přírodní, která se při lití ve vakuu vyzkoušela v rámci této práce také.

7.1 Tvar odlitku

Nejprve se muselo rozhodnout, co se bude odlévat. Tvar odlévaného tělesa se vybral s ohledem na mechanickou zkoušku pevnosti v tahu, aby se zjistilo, jak velký vliv mají plniva na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu. Proto se použil tvar tělesa podle dané příslušné ČSN normy, který se k takovéto zkoušce používá. Vzorové zkušební těleso včetně formy, která byla podle něj vyrobená, se nachází na obr. 25.

7.2 Forma pro odlitek

Forma pro odlitek se vytvořila ze silikonu. K výrobě formy je zapotřebí tzv. master model, který se musí někde vyrobit. V případě této práce bylo použito výrobku pocházejícího ze vstřikovacího lisu.

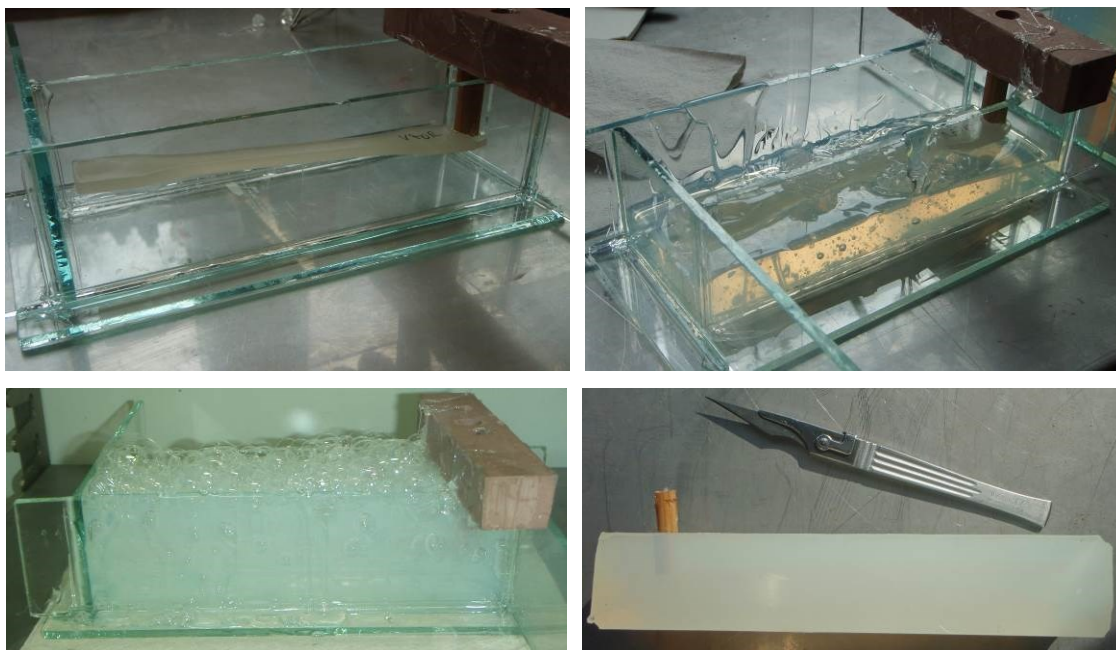


Obr. 25 Vzorové těleso s hotovou formou

Samotná forma pro zalití vzorového dílu silikonem se vytvořila z vhodně velkých destiček skla, které se k sobě přilepili použitím lepicí tavné pistole. Vzorové těleso se zavěsilo do formy na přilepeném dřevěném kolíku. Těleso se vzhledem k rovině mírně naklonilo, aby místo odfuku bylo trochu výše než místo vtoku. Díky tomu se dostává při lití ve vakuové komoře případný vzduch z formy snadněji. Forma se následně zalila silikonem, který bylo potřeba nejprve připravit. Do silikonu se přidala ve správném poměru složka způsobující jeho ztuhnutí a řádně se s pomocí vrtačky s míchacím nástavcem v kbelíku promíchala. Potom se silikon musel ještě odvzdušnit ve vakuové komoře, aby forma neobsahovala bublinky vzduchu, které by hlavně v oblasti kolem vzorového tělesa znehodnocovaly povrch formy. Vzorové těleso se zalilo do potřebné výšky silikonem, který se dal ve formě znovu odvzdušnit do vakuové komory. Po vyndání z komory se ještě odstranily zbylé bublinky ze spodní strany modelu do stran a pak už se jen nechala forma dostatečně dlouho tuhnout. Čas potřebný pro ztuhnutí takto připraveného silikonu byl 12 hodin.

Po ztuhnutí se z formy nejprve vyndal dřevěný kolík, po kterém vznikl vtokový otvor. Průměr kolíku byl vybrán vzhledem k požadovanému průměru vtoku licího trychtýře. Forma se rozřízla skalpelem přibližně v půli zalitého tělesa, čímž vznikla dělicí rovina. Kraje formy se řezaly vlnovitým pohybem, aby se následná forma lépe

skládala do sebe. Nakonec se ještě udělaly dutou jehlou dva malé výfukové otvory, které slouží k odvedení případného zbytkového vzduchu z dutiny formy při odlévání. Postup výroby formy je znázorněn na obr. 26.



Obr. 26 Výroba silikonové formy

Takovéto formy se vyrobily dvě, aby práce probíhala rychleji. V jedné se vytvrzoval materiál po odlití, zatímco s druhou se zatím pracovalo. Druhá forma se vyrobila s větším vtokovým otvorem s myšlenkou pro snadnější lití plnivy, která budou litá přímo z kelímku. Větší trychtýř měl vtokový otvor o průměru 8 mm, zatímco menší jen 6,7 mm.

Formu bylo po každém lití vždy potřeba připravit na další práci stejným způsobem. Vnitřek formy se očistil od případných nečistot stlačeným vzduchem, zejména se muselo dávat pozor na důkladné profouknutí výfukových otvorů, aby v nich nezůstal zbytkový materiál z předešlého lití. Po očištění se mohla dát forma opět dohromady. Obě části formy se s mírným stlačením k sobě ručně spojovaly kancelářskými sešívacími sponkami, aby nedocházelo k zatékání materiálu do dělicí roviny.

Před odléváním se forma vkládala na pár minut do pece, protože podle přiloženého manuálu k lici polyuretanové směsi by měla mít správně teplotu 35 °C. Tato teplota zajistila snížením viskozity lepší rychlost zatékání lici směsi a zkracovala celkové výrobní časy.

7.3 Postup lití

Podle poměrové tabulky se pro odlévání 30 g polyuretanové směsi navážilo nejdříve 11,3 g polyolu a 18,8 g isokianátu. Kelímek s polyolem se za dobu lití všech zkušebních vzorků neumýval. Při lití polyolu do isokianátu se odlévalo vždy stejným způsobem po dobu 10 vteřin, aby se zajistilo odlití správného množství. Z důvodu, aby se nalila požadovaná váha i při prvním zkušebním vzorku, nalilo se do kelímku dané množství a 10 vteřin se zas vylévalo zpět do láhve. Po té se nalilo množství polyolu na vynulované váhy, které se již normálně použilo. Na obr. 27 jsou vidět používané digitální váhy, které vážily s přesností na 0,1 g.



Obr. 27 Používané váhy

Po navážení jednotlivých složek polyuretanové směsi se kelímky zajistily pomocí odpružených čepů na svá místa ve vakuové komoře. Stolek se připravil do správné výšky, aby hrdlo trychtýře bylo umístěno co nejblíže pod licím kelímkem. Pod formu se dával pro jistotu kousek papíru, kdyby něco ukápl. Při ustavení formy se dávalo pozor, aby trychtýř nebyl umístěn příliš vzadu.

Na vakuové pumpě se pootočilo odlehčujícím nákrůžkem do pracovní polohy a otočením příslušného ventilu směrem nahoru začalo vakuování. Vakuování materiálu probíhalo poměrně rychle, ale v různé dny se potřebná doba pro tento proces lišila. Někdy se přestaly tvořit bublinky již po asi 7 minutách, jindy to trvalo dvakrát déle. Nakonec se většinou vakuovalo kolem 12 minut. Vliv mohlo mít časté otevírání nádob složek a jejich postupné ubývání a tím zvětšování prostoru pro pohlcování plynů ze vzduchu. Po odsátí vzduchu z jednotlivých složek, tedy po čase, kdy přestaly z tekutin vycházet bublinky, se pomocí příslušné ovládací páky otočilo s kelímkem polyolu k druhému kelímku. V momentě začátku vytékání polyolu z kelímku se spustil

připravený časovač, který začal odpočítávat 10 vteřin. Po odpočtu začaly stopky počítat nový čas a zároveň hlasitě pípat po dobu 1 minuty. Doba pípání souhlasí s doporučenou dobou společného míchání složek pro správné vytvrzení polyuretanové směsi. Na obr. 28 je vidět proces vakuování polyolu.



Obr. 28 Vakuování polyolu

Po uplynutí doby potřebné k řádnému promíchání, se mohlo začít odlévat. Do teď vše probíhalo při nepřetržitém vakuování, které v tomto momentě bylo potřeba zastavit. Do prostoru vakua komory se ventilem připustilo trochu vzduchu přibližně na hodnotu $-0,9$ bar. To zajistilo případné splasknutí bublinek a konec tvoření dalších, které mohly po smíchání složek ještě vzniknout. Při tomto podtlaku se naklopil kelímek se směsí do trychtýře a čekalo se, až zateče materiál do výfukových otvorů. Vše muselo proběhnout poměrně rychle, protože čas zatuhnutí tohoto polyuretanu je mezi 5 až 6 minutami. Proto se nejdéle asi po 4 minutách musel do komory vpustit vzduch. Tlak vzduchu v některých případech ještě mírně pomohl se zatlačením tekutiny do rohů s výfukovými otvory. Obr. 29 vyobrazuje průběh odlévání polyuretanové směsi.



Obr. 29 Před a po odlévání polyuretanové směsi

Po zavzdušnění komory se kelímky vyndaly. Menší s polyolem se zavičkoval a větší s isokianátem se musel společně s míchací lopatkou rychle očistit, než došlo k zatvrdnutí směsi. K čištění se používalo ředidlo k tomu určené a z bezpečnostních důvodů se musely používat rukavice ve spojení s dobrým odvětráváním prostoru kvůli toxicitě látek.

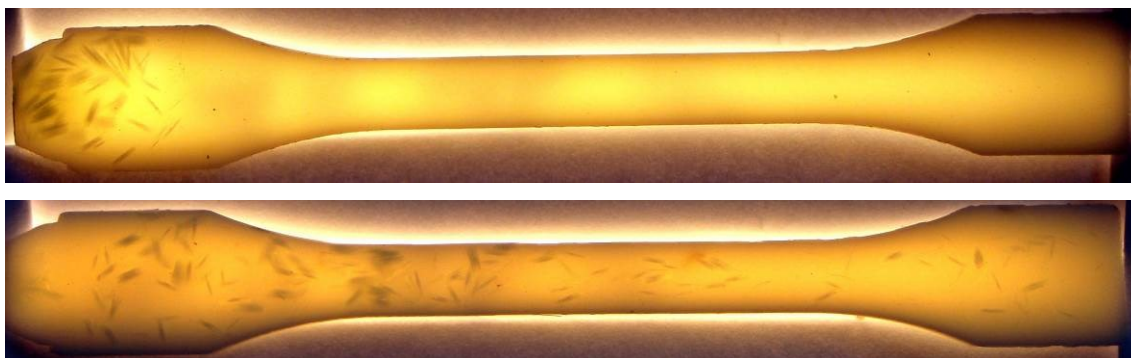
Po dobu čištění zatím tekutina ve formě zgelovatěla. V tomto momentě nastal čas dát zalitou formu do vyhřáté pece. Pec byla nejčastěji nastavená na 70 °C, což je doporučená teplota pro vytvrzování polyuretanu, které trvá při této teplotě pouze 20 minut. Někdy bylo potřeba čekat i déle v závislosti na nižší nastavené teplotě, která byla potřeba zas pro jiné činnosti v laboratoři.

7.4 Materiál bez plniv

Nejprve bylo zapotřebí odlít zkušební tělesa bez plniv, aby se pak vzorky s přidanými plnivy mohly porovnat, jestli došlo k zlepšení. Vzorky byly odlité poměrně rychle a bez problému. Při částečném ztuhnutí plastu se odstraňoval z formy vtokový trychtýř. To šlo udělat i po úplném vytvrzení směsi, ale bylo to trochu obtížnější kvůli vyšší pevnosti. Po vyjmutí odlitků z formy bylo vždy potřeba ještě odříznout malou pilkou zbylou část plastu od vtokového otvoru, aby se později daly vzorky upnout do čelistí stroje pro mechanické zkoušky. Občas se při vyndání z formy zjistilo pár menších povrchových nedostatků v podobě bublinek a to i v oblasti, kde by to mohlo mít efekt v podobě vrubu při trhací zkoušce.

7.5 Materiál s plnivy z krátkých vláken

Při postupu přidávání plniv z krátkých vláken se zvolené množství vláken nasypalo přímo do většího kelímku, který při vakuování obsahuje míchací lopatku. Nejprve se navázilo potřebné množství vláknenného plniva v prázdném kelímku, potom se vynulovala váha a k vláknům se nalilo stejné množství isokianátu jako při lití čistých vzorků. V komoře se při vakuování směs isokianátu a přidaných vláken společně míchala. Celé množství polyuretanové směsi pak obsahovalo zvolený hmotnostní podíl vláken. Takto se to úspěšně provedlo pouze u lití kokosových vláken. Provedené experimenty s litím z plniva skládajícího se ze 4,5 mm dlouhých skelných vláken skončily neúspěšně, stejně jako pokus přidání 10 hm. % vláken juty. Nepodařené pokusy s krátkými skelnými vlákny jsou vidět na obr. 30.



Obr. 30 Neúspěšná metoda lití polyuretanové směsi s krátkými skelnými vlákny z kelímku (odshora: 30 hm. %, 10 hm. %)

Kvůli nezdaru se vymyslel odlišný postup, kdy další metoda přidávání plniva spočívala v navážení hmotnostního množství přímo pro zkušební těleso. Při zvážení pěti vzorků z čistého polyuretanu se zprůměrováním zjistila váha jednoho vzorku. Pro danou váhu vzorku se navážilo hmotnostní množství, které se vsypalo nasucho trychtýřem přímo do připravené formy. S formou se muselo trochu třást, aby se vlákna z trychtýře dostala do formy všechna. Při třesení s formou se vlákna dala poměrně rovnoměrně rozprostřít a zároveň se v celku dobře srovnaly do požadovaného směru.

Před metodou vsypáním trychtýřem, se zkusilo nasypat dané množství přímo do rozdělené formy. Do dutiny tvaru odlitku se naskládala vlákna, která se přiklopila druhou půlkou formy, následně se to celé klasicky zajistilo kancelářskými sponkami. Třesením formou se vlákna opět poměrně dobře porovnala do požadovaného směru. Nevýhodou této metody byla větší pracnost spojená s dostáním vláken pouze do dutiny formy, protože vlákna často přechnívala do dělicí roviny. Tyto dvě metody se použily pouze u vzorků při přidávání skelných vláken délky 4,5 mm. Fotka z této metody je na obr. 31.



Obr. 31 Skelná vlákna rozprostřená do dutiny formy (30 hm. %)

7.5.1 Sekaná skelná vlákna

První pokusy probíhaly se skelnými vlákny o délce 4,5 mm. Použilo se 30 hm. % vláken, která se nejprve nasypala na sucho do formy. Po třesení s formou tak, aby byla vlákna rozmístěna rovnoměrně a zároveň, co nejvíce v podélném směru zkušebního tělesa, se dutina formy zalila polyuretanem.

Při lití se vlákna málokdy pohnula, zůstávala na místě tak, jak se je podařilo uspořádat vně komoru. Takový postup přidávání plniva bude možný pravděpodobně jen pro krátká vlákna s vyšší hustotou, jakou skelná vlákna právě mají. Tekutá polyuretanová směs teče ve formě poměrně pomalu a při nízké viskozitě, ale i přesto by v případě lití lehčích vláken, jako je např. většina přírodních, mohla tekutá směs přenášet určité množství plniva směrem od vtoku do zadní části formy. Zalitá forma se 30 hm. % skelných vláken je na obr. 32.

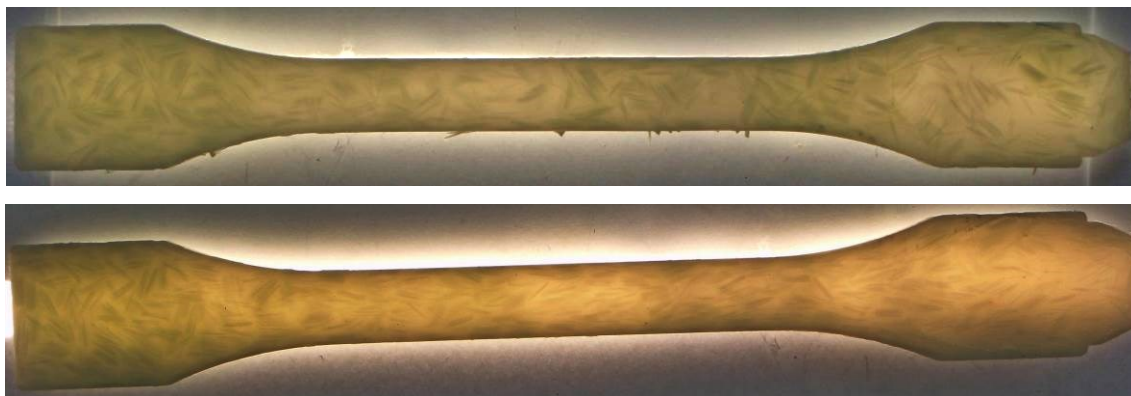


Obr. 32 Zalitá forma se 30 hm. % skelných vláken

Takto připravovaný zkušební vzorek má ještě nevýhodu v umístění plniva pouze na spodní straně odlitku, ale s tímto problémem jsme se setkali i u lití s přidávanými kokosovými vlákny přímo z kelímku. U tohoto plniva se nachází pár vláken i u horní strany výrobku, ale spíš je to zanedbatelné množství. Vliv bude v tomto případě hrát jistě i nižší hustota kokosových vláken oproti skleněným. Způsob rozložení vláken ve vzorku je vidět na prosvětleném vzorku na obr. 33. Z obrázku je patrné, že při sypání vláken přes trychtýř jsou vlákna mnohem lépe srovnaná v požadovaném směru. Navíc některá ručně vkládaná vlákna vylézají z tělesa v místě, kde byla dělící rovina formy. Také je patrné, že v místě vtoku (pravá strana obrázku) se vlákna při lití nejvíce pohnula a je jich tam tedy méně.

Nevýhodou při použití těchto vláken bylo, že vzorek se po vyjmutí a vychladnutí z formy výrazně prohнул ve směru vláken. Tento efekt byl zjevně způsoben velkou

tuhostí skelných vláken, která vzhledem k jejich zakládání, byla ve zkušebním tělese rozmístěna velmi nerovnoměrně a to pouze v povrchové vrstvě, což bylo příčinou nehomogenního smrštění mezi touto vrstvou a zbytkem zkušebního tělesa.



Obr. 33 Zkušební vzorek se skleněnými vlákny, nahoře ručně vkládaná, dole sypaná přes trychtýř

7.5.2 Vlákná z juty

Protože se naskytla možnost použití přírodních vláken, uskutečnilo se několik pokusů také s nimi. Prvně se zkusilo 30 hm. % krátkých vláken juty, kdy v důsledku velké nasákavosti juta pohltila v podstatě veškerou polyuretanovou směs a odlití se tak stalo prakticky nemožným. Zkusilo se ještě 10 hm. %, ale ani tentokrát nebylo lití úspěšné. Juta udělala v trychtýři z vláken jeden velký chomáč, přes který se pomalu propouštěla v podstatě jen čistá polyuretanová směs, která ani v důsledku ucpání vtokového otvoru jutou nezatekla příliš daleko. Na obr. 34 je vidět, co se stalo při míchání vláken juty v kelímku.



Obr. 34 Míchání s vlákny z juty při obsahu 10 hm. %

7.5.3 Kokosová vlákna

Mletá kokosová vlákna se vybrala až po nepodařených pokusech s krátkými vlákny z juty. Vlákna z kokosu měla nasákavost mnohem menší než juta. Nejprve se zkusilo odlít vzorek s 10 hm. %, ale vlákna zahustila směs příliš, a proto se vzorek odlil jen přibližně do poloviny, ale i tak to vypadalo mnohem lépe než v porovnání s odléváním s vlákny juty. Další pokus byl s 5 hm. %. Odlití skončilo lépe, ale nebylo stále příliš uspokojivé, protože forma se opět nevyplnila v celém objemu. Proto se nakonec přistoupilo k plnění pouze 3 hm. %, s kterými nebyl žádný problém.

Kokosová vlákna měla ještě jeden vedlejší vliv na odlévaný materiál. Podle přidaného množství barvila materiál do hněda, proto by šel dostatečně jemný prášek z kokosových vláken případně použít i jako přírodní hnědé barvivo. Vzorky s různým obsahem kokosových vláken se nachází na obr. 35.



Obr. 35 Odlitky s kokosovými vlákny, odshora dolů: 10 hm. %, 5 hm. %, 3 hm. %, 3 hm. % pohledem zespodu

Při zpracovávání se objevil zajímavý jev u procesu vakuování, který se stával pouze u kokosových vláken. Doba vakuování trvala o chvilku déle, ale na to mohly mít vliv i jiné okolnosti. Po uklidnění hladiny obou složek se nalil polyol do isokianátu obsahující plnivo kokosových vláken. Po smíšení složek začala směs opět bublat tak, jako kdyby k žádnému vakuování nedošlo. S ohledem na čas možného zpracování směsi se proto čekalo, co nejdéle to bylo možné, aby se dostalo ze směsi co nejvíce vzduchu. Také proto se při odlévání s tímto plnivem připouštěl vzduch až na hodnotu – 0,85 baru, protože jinak se stalo, že směs začala krátce po odlití vydávat ještě další

bublinky. Na obr. 36 je vidět, že odlévaný materiál nebyl úplně odvzdušněn a že množství vláken hrálo také svou roli.



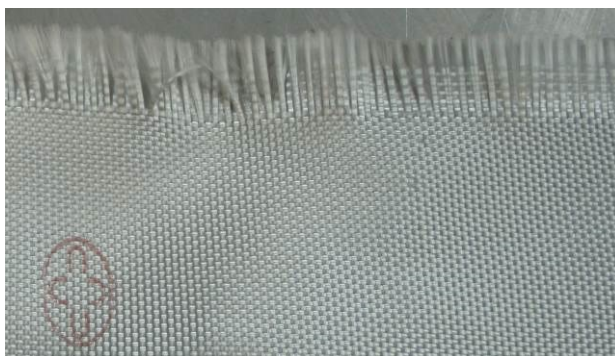
Obr. 36 Tvorba vzduchových bublin po smíšení složek, zprava: 10 hm. %, 5 hm. %, 3 hm. %

7.6 Materiál s plnivý z dlouhých vláken

Pro plniva tvořená z pramenů vláken bylo zapotřebí vymyslet odlišný způsob přidávání než v případě krátkých vláken. Princip spočíval v naskládání vláken přímo do dělicí roviny formy. Prameny se na obou stranách formy přidržely tak, aby byly lehce napnuté. Pak se přiklopila forma druhou polovinou. Formy se k sobě lehce stlačily a prameny bylo možné případně ještě zlehka přitáhnout, aby byly opravdu napnuté v dělicí rovině a neklesaly ke dnu formy. Pak se již obě části formy při potřebném stlačení zajistily k sobě ručně kancelářskými sešívacími sponkami.

7.6.1 Skelné prameny

Zdrojem pramenů ze skelných vláken se stala tkanina, která byla k dispozici v laboratoři. Prameny z tkaniny šly poměrně jednoduše oddělit. Na každý vzorek se použilo pouze 5 pramenů, které se naskládaly rovnoměrně do řezu dělicí roviny. Tento počet pramenů prakticky neměl žádnou změřitelnou váhu a bude proto zajímavé, jak velký vliv budou mít na pevnost v tahu ve směru vláken odlévaného materiálu. Skelná tkanina, která se stala zdrojem pramenů pro zkušební vzorky, se nachází na obr. 37.



Obr. 37 Detail skelné tkaniny

Pro uspořádání skelných pramenů s rovnoměrnými mezerami mezi nimi se prameny zajistily na jedné straně formy jednou kancelářskou sponkou. Na pramenech bylo zapotřebí udělat malý uzel, který zabraňoval ve vysunutí vláken zpod sponky při jejich napínání. Pomocné zajištění a rozmístění pramenů v dutině formy je vyobrazeno na obr. 38.



Obr. 38 Umisťování pramenů ze skelných vláken do dutiny formy

Zalévání formy proběhlo naprosto bez problému. Po vytvrdnutí a vyndání odlitku z formy se zkušební těleso po pár desítkách minut ve směru vláken mírně prohnulo. Prohnutí ovšem nebylo tak výrazné jako v případě použití krátkých skelných vláken. Možnou příčinou mohl být velký rozdíl teplotního součinitele roztažnosti mezi vlákny a matricí ve spojitosti se silně jednosměrným vyztužením, kdy při vychladnutí zkušebního tělesa došlo k rozdílnému smrštění. Vliv mohlo mít také mírné předepnutí vláken ve formě, které bylo nutné pro požadované umístění vláken pouze do dělicí roviny, která se nenacházela přesně v polovině zkušebního tělesa.

7.6.2 Konopí

Dalšími dlouhými vlákny, která se použila, byla přírodní vlákna z konopí. S ohledem na bezproblémové vložení do formy a její následné zalití, se používalo pouze malé množství, které činilo jen asi 3 hm. % zkušebního tělesa.

Postup vkládání do formy byl velmi podobný způsobu přidávání skelných pramenů, jen s rozdílem, že v tomto případě se nepoužívalo sponky pro zajištění jedné strany pramenů. Prameny se co nejlépe vložily do dutiny formy, aby nevyčnívaly do boků dělicí roviny. Po přiklopení druhé části formy, se prameny lehce postupně natáhly za oba konce konopí, které přecházely ze silikonové formy ven. Forma se následně na pevnost zajistila sponkami. S odléváním ani se samotnými odlitky nebyl žádný problém. Po vyndání z formy se přecházející konce pramenů konopí oddělily od odlitku. To bylo ostatně nutné udělat i u odlitků se skelnými vlákny. Způsob pokládání pramenů z konopí do dutiny formy a následný odlitek je vidět na obr. 39.



Obr. 39 Od shora: způsob vložení pramenů do formy, hotový odlitek

7.7 Porovnání použitých plniv

Z hlediska pracnosti, bylo nejjednodušší přidávání vláken, která se rozmíchávala přímo v kelímku s isokianátem, tedy kokosových vláken. Naopak nejsložitější byla práce se skelnými prameny a jejich umístění do formy požadovaným způsobem. Skelné

prameny se občas přichytávala na povrch silikonové formy, což pravděpodobně způsobovala statická elektřina.

Z hlediska zalévání formy polyuretanovou směsí, byla nejvíce problematická kokosová vlákna, která způsobovala nejvýraznější nárůst hustoty směsi. Navíc se u nich projevovalo zmíněné bublání při slití složek do jedné směsi.

Skelné prameny a zejména krátká skelná vlákna způsobovaly nežádoucí deformaci odlévaného tělesa. Ostatní typy vláken zkušební těleso nedeformovaly vůbec nebo jen zanedbatelně. V porovnání s ostatními použitými plnivy, měla vliv na barvu odlitku pouze kokosová vlákna, což bylo dáno větším zastoupením kokosových částic velikosti mikronů, které se rovnoměrně rozptýlily a probarvily zkušební těleso v celém objemu.

Koncentrace krátkých vláken ve spodní oblasti zkušebního tělesa vzhledem k jeho poloze během tuhnutí polyuretanu byla zapříčiněna působením gravitačních sil, přičemž větší měrná hustota skelných vláken tento sedimentační jev ještě zdůraznila. Řešením by mohlo být např. otáčení s formou odlitku po vytažení z komory, kdy ještě směs nestihla zatuhnout a je stále tekutá. Při tomto postupu by se musel odstranit vtokový trychtýř se zbylou směsí a zároveň by bylo potřeba utěsnit vtokový otvor. Vlivem průhlednosti nezatuhlé směsi by bylo proces možné opticky kontrolovat, ale jen do doby, než směs začne tuhnout a ztrácet schopnost propouštět světlo. Nejprve směs zatuhne na plochách formy, což dále pokračuje směrem do středu odlitku. Při tuhnutí dochází ke strukturním změnám uvnitř odlitku a vlivem postupného sítování struktury polyadičními procesy dochází ke ztrátě transparentnosti celého systému, což vytváří dojem, že směs zbělá a nejsou tak vidět pozice vláken.

8 Zkoušení mechanických vlastností

Vzhledem k tvaru odlitku, bylo přidávání plniv prováděno zejména na důraz pro zlepšení pevnosti. Proto se všechny odlité zkušební vzorky testovaly na stroji pro statické zkoušky TiraTest 2300 (viz obr. 40), který se nachází v laboratoři spadající pod katedru strojírenské technologie.

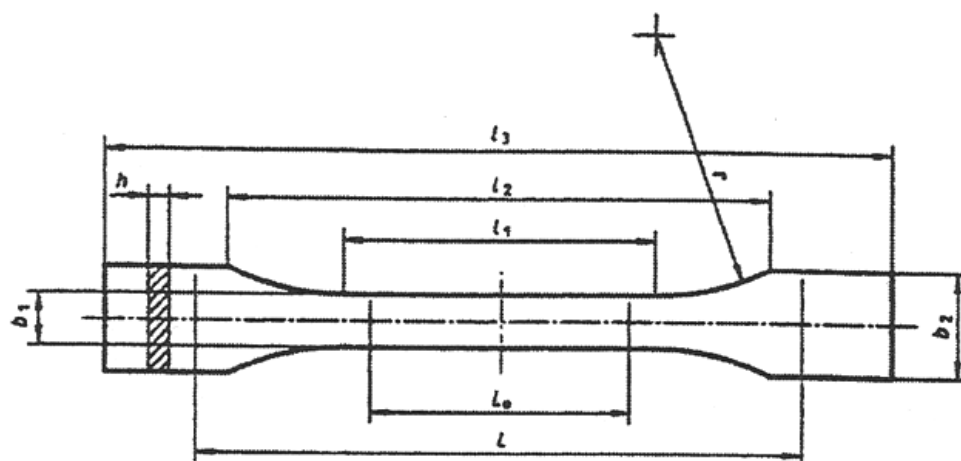


Obr. 40 Stroj pro statické zkoušky TiraTest 2300

8.1 Zkouška tahem

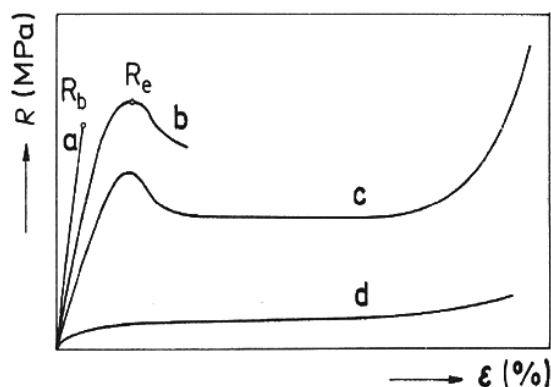
Provedení zkoušky tahem je u polymerních materiálů obdobné jako u kovových. Zkouška spočívá v působení síly na zkušební těleso ve směru jeho podélné osy. Síla se plynule zvětšuje, dokud nedojde k přetržení zkušebního tělesa nebo není dosaženo zvolených hodnot u měřených parametrů. V průběhu trvání zkoušky je neustále zaznamenávána velikost síly působící na těleso, která je vyvolána konstantní rychlostí zatěžování, a hodnota prodloužení tělesa vyvolaného působící silou. [14]

Zkušební vzorky jsou nejčastěji ve tvaru oboustranné lopatky, tzv. osmičky. Na obr. 41 se nachází okótovaný tvar zkušebního tělesa pro tahové zkoušky. Volba rychlosti průběhu zkoušky by měla být taková, aby celá zkouška až do přetržení zkušebního tělesa trvala kolem 60 sekund. Pro vzájemnou porovnatelnost hodnot získaných tahovou zkouškou se do protokolu povinně uvádějí hodnoty rychlosti deformace, okolní teplota a relativní vlhkost ovzduší. Charakteristické křivky napětí pro polymerní materiály znázorňuje obr. 42. [14]



Typ tělesa	Symbol	1A	1B
Celková délka	l_3	≥ 150	
Délka zúžené rovnoběžné části	l_1	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
Poloměr	r	20 až 25	≥ 60
Rozpětí mezi širokými rovnoběžnými částmi	l_2	104 až 113	106 až 120
Šířka konců	b_2	$20 \pm 0,2$	
Šířka zúžené rovnoběžné části	b_1	$10 \pm 0,2$	
Doporučená tloušťka	h	$4 \pm 0,2$	
Počáteční měřená délka	L_0	$50 \pm 0,5$	
Počáteční vzdálenost čelistí	L	115 ± 1	$l_2 + 5$

Obr. 41 Okótovaný zkušební vzorek určený k pevnostní zkoušce v tahu [14]



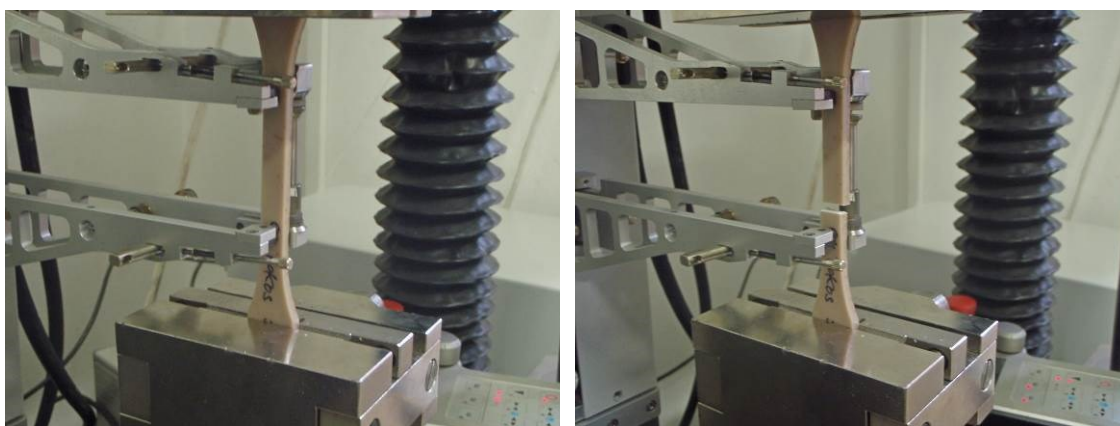
Obr. 42 Charakteristické křivky zkoušky u plastů a pryží, a) křehké reaktoplasty a amorfní termoplasty, b) termoplasty s omezenou možností orientace makromolekul a střední houževnatostí, c) termoplasty s dobrou možností orientace makromolekul a větší houževnatostí (hlavně semikrystalické), d) nekystalizující pryže a blokové polymery [14]

8.2 Průběh zkoušky

Přípravená zkušební tělesa byla kondicionována v prostředí dle ČSN EN ISO 291 po dobu 24 hodin (jde o 23 °C při relativní vlhkosti 50 %). Zkouška mechanických

vlastností byla provedena dle ČSN EN ISO 527-1 na zkušebních tělesech typu 1A. Počáteční předpětí zkušebních vzorků byla nastavena na hodnotu 10 N a rychlost zatěžování (pohybu příčnicku) byla 50 mm/min, přičemž deformační chování bylo zaznamenáno pomocí extenzometru s počáteční dráhou měření 50 mm.

Zkouška proběhla poměrně rychle a bez problémů. Nejprve se ustavilo zkušební těleso do čelistí pomocí viditelných značek na čelistech. Po potřebném utažení čelistí se vzorek předepnul na danou hodnotu, aby výsledky nebyly ovlivněny velikostí předepnutí vzorku v čelistech. Následně se přiložil ke vzorku extenzometr a přes softwarové komunikační rozhraní se již spustila samotná zkouška. Vyobrazení průběhu zkoušky se nachází na obr. 43. Na obr. 44 jsou vidět lomové plochy některých vzorků.



Obr. 43 Před a po provedení zkoušky tahem

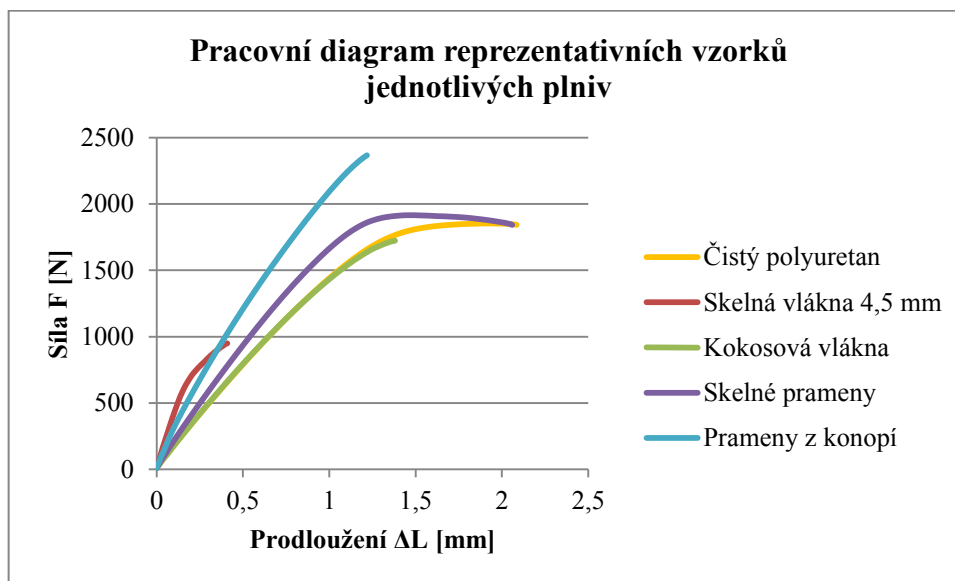


Obr. 44 Lomové plochy u vybraných vzorků (zleva: kokosová vlákna, krátká skelná vlákna, skelné prameny)

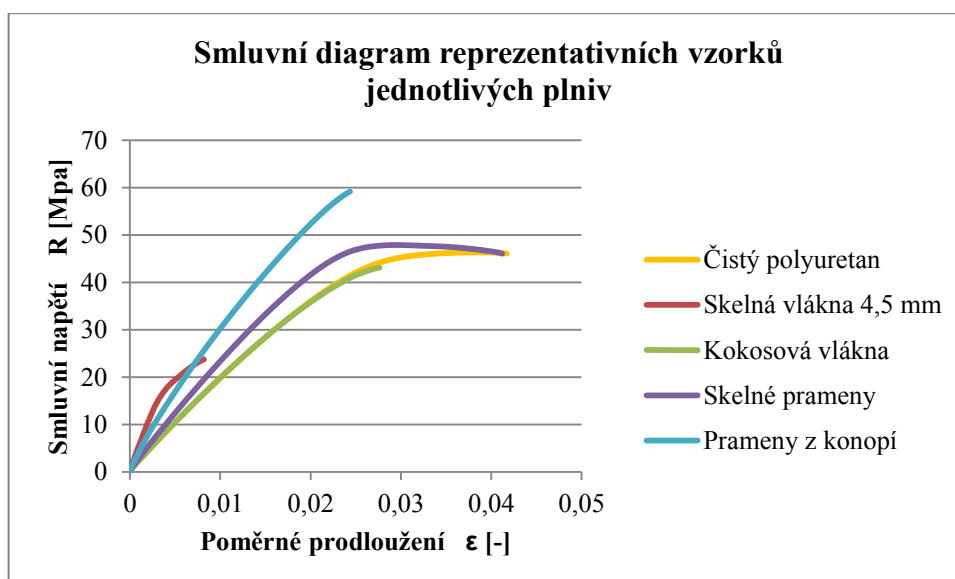
8.3 Porovnání vzorků

Průběhem zkoušky se vzorky v rámci stejného druhu plniva příliš nelišily. Výjimku tvořily pouze vzorky s 30 hm. % krátkých skelných vláken. V tomto případě došlo k přetržení tělesa u dvou vzorků při výrazně větším prodloužení a při působení větších sil, než u zbylých tří. Tento jev si lze vysvětlit různou orientací vláken

vyztužujícího plniva, která je při použitém výrobním postupu zkušebních těles velmi těžko kontrolovatelná. Pracovní diagramy pro všechny vzorky jsou uvedeny v příloze I. Na obr. 45 a 46 je znázorněn průběh mechanické zkoušky reprezentativních vzorků od jednotlivých plniv. Reprezentativní vzorek byl vybrán vždy z pěti zkoušených vzorků, aby se průběhem zkoušky co nejméně odlišoval od ostatních vzorků v rámci jednoho druhu plniva. Každý vybraný vzorek tedy představuje typický průběh zkoušky pro použitý druh plniva.

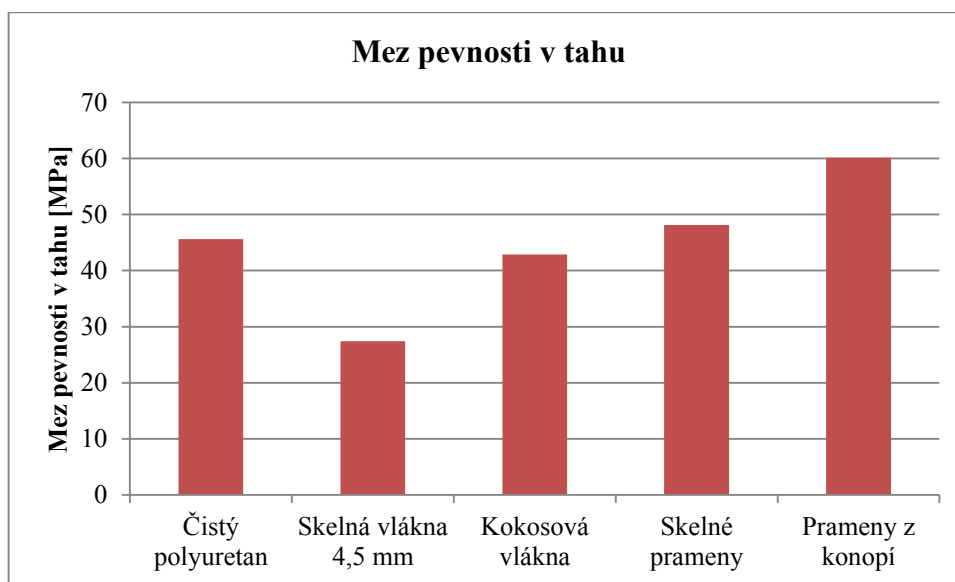


Obr. 45 Pracovní diagram reprezentativních vzorků



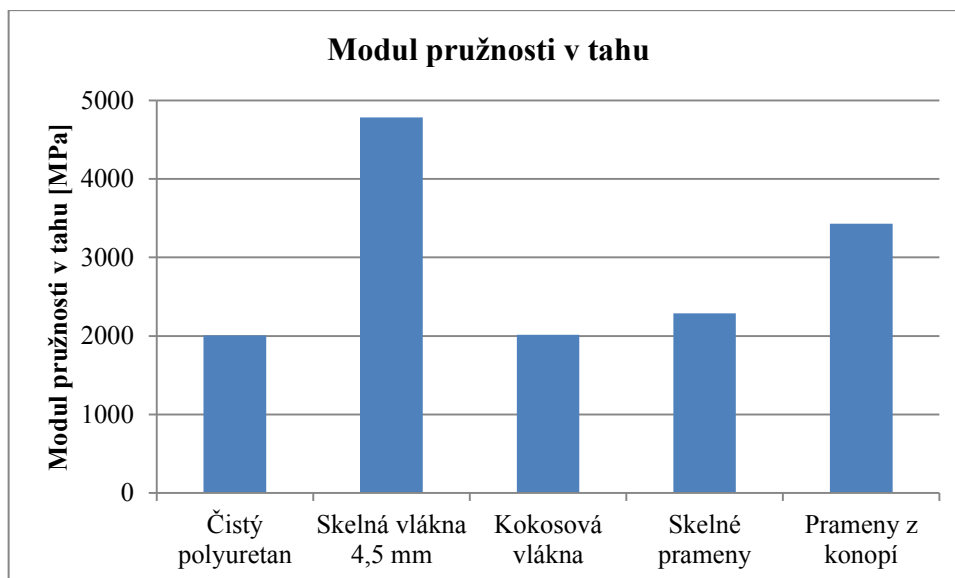
Obr. 46 Smluvní diagram reprezentativních vzorků

Vliv plniva se u zkoušených vzorků projevil na pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu i na tažnosti materiálu. Získané hodnoty ze zkoušky se pro každý druh plniva zprůměrovaly ze všech pěti vzorků. Porovnání vlivu plniva na pevnost materiálu oproti čistému polyuretanu se nachází na obr. 47.



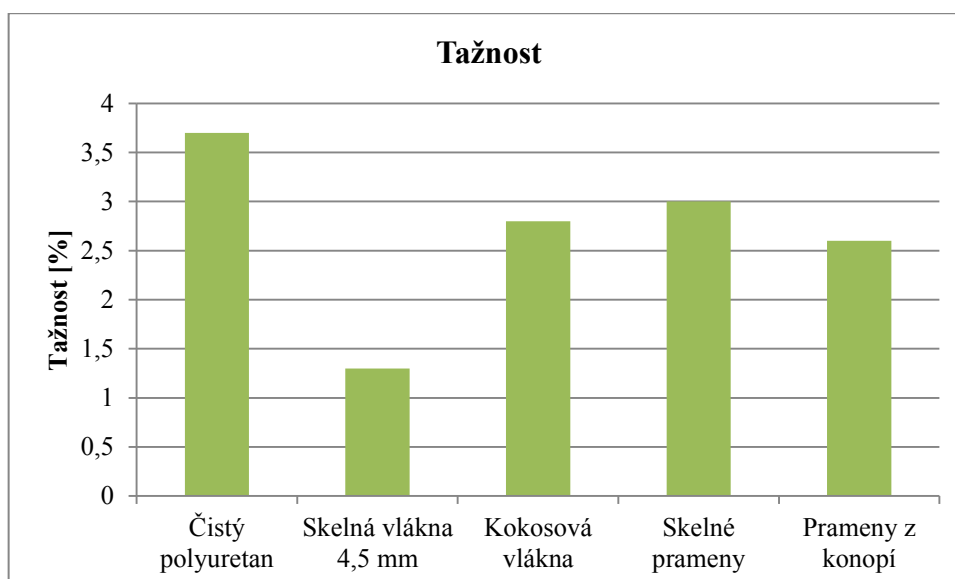
Obr. 47 Vliv plniva na pevnost v tahu

Z grafu je patrné, že největší vliv na mez pevnosti v tahu měla vlákna konopí, zatímco použité skelné prameny měly pravděpodobně kvůli příliš nízkému obsahu vliv pouze zanedbatelný. V případě krátkých vláken se pravděpodobně projevil vliv jejich orientace vzhledem k tahovému napětí a vzorky proto nedosahovaly meze pevnosti původního materiálu. U vláken z kokosu se mez pevnosti zmenšila jen mírně, ale poměrně vysoký obsah skelných vláken snížil pevnost celkem podstatně. Kromě jejich orientace to mohlo způsobit také silně jednostranné umístění vláken ve vzorku. Navíc byla vlákna shlukována v plochých krátkých pramenech, které se nepodařilo rozmíchat na jednotlivá vlákna, to mohlo zapříčinit nedostatečné spojení s matricí.



Obr. 48 Vliv plniva na modul pružnosti v tahu

Z obr. 48 je patrné, že nejvyššího modulu pružnosti se dosáhlo při použití plniva krátkých skelných vláken. Vysoké navýšení se projevilo díky použití 30 hm. %. Kokosová vlákna nemají na E-modul vůbec žádný vliv. Skelné prameny a konopí vyztužily materiál adekvátně k použitému množství. Tažnost vzorků se zmenšila při použití jakéhokoliv plniva, největší vliv měla díky svému obsahu krátká skelná vlákna. Porovnání tažnosti zkoušených plniv je vidět na obr. 49.



Obr. 49 Vliv plniva na tažnost polyuretanu

9 Závěr

Stanovené cíle práce se podařilo víceméně splnit. Postup přidávání plniv do výrobků odlévaných ve vakuu je poměrně omezený. V případě přidávání vyztužujícího plniva metodou naskládáním vláken nebo tkanin apod. do formy se musí dbát na správnou orientaci vláken a na jejich umístění. Umístění pouze do dělicí roviny, jako tomu bylo u prováděných experimentů, je možné pouze u výrobků deskového tvaru. U výrobků složitějších tvarů by mohlo být možné řešení např. v podobě 3D tkanin, ale to pravděpodobně výrobek dost prodraží. Umisťování přímo do forem je i pracnější. Jednodušší je vsypání plniv do kelímku a odlití materiálu s plnivem přímo do formy. Tato metoda je závislá na mnoha faktorech, zejména na viskozitě výsledné směsi, která se výrazně mění s typem a koncentrací použitého vyztužujícího plniva. Tento fakt výrazně problematizuje proces odlití, kdy směs vlivem snížené tekutosti nemusí dotéci do zadních pozic lící formy. Také vtokový otvor se musí vhodně dimenzovat a umístit, protože průběh plnění je závislý na směru šíření materiálu ve formě a určuje tak výslednou orientaci vláken. Dalším problémem je usazování plniv na dně formy v důsledku sedimentačních procesů zapříčiněných vyšší hustotou přísad. Řešením tohoto problému by mohla být již výše zmíněná rotace s formou při tuhnutí odlitého materiálu. U materiálů s rychlou dobou zpracovatelnosti jako je použitý polyuretan, je ovšem poměrně málo času.

Z výsledků experimentů se dá předpokládat, že největší význam pro vakuové lití z hlediska zvýšení pevnosti v tahu mají plniva tvořena z dlouhých vláken, jejichž pozice v dutině formy a tedy ve výrobku je zajištěna již před samotným litím materiálu. Pro dobrý efekt vyztužení je potřeba dostatečné množství vláken, které ale nebude výrazně zhoršovat zatékavost lící směsi. V tomto pohledu se jeví jako nejlépe použitelné materiály s velmi nízkou viskozitou při odlévání. U krátkých vláken a částicových plniv není příliš dobře kontrolovatelná orientace vláken a částic a jejich implementace do výrobku může vést naopak ke snížení meze pevnosti. Hodnotu E-modulu mohou ovšem při správném obsahu a vhodně zvoleném druhu plniva podstatně zvýšit, jako je tomu v případě použitých krátkých skelných vláken. Tažnost materiálu se snížila se všemi použitými plnivem.

Seznam použité literatury

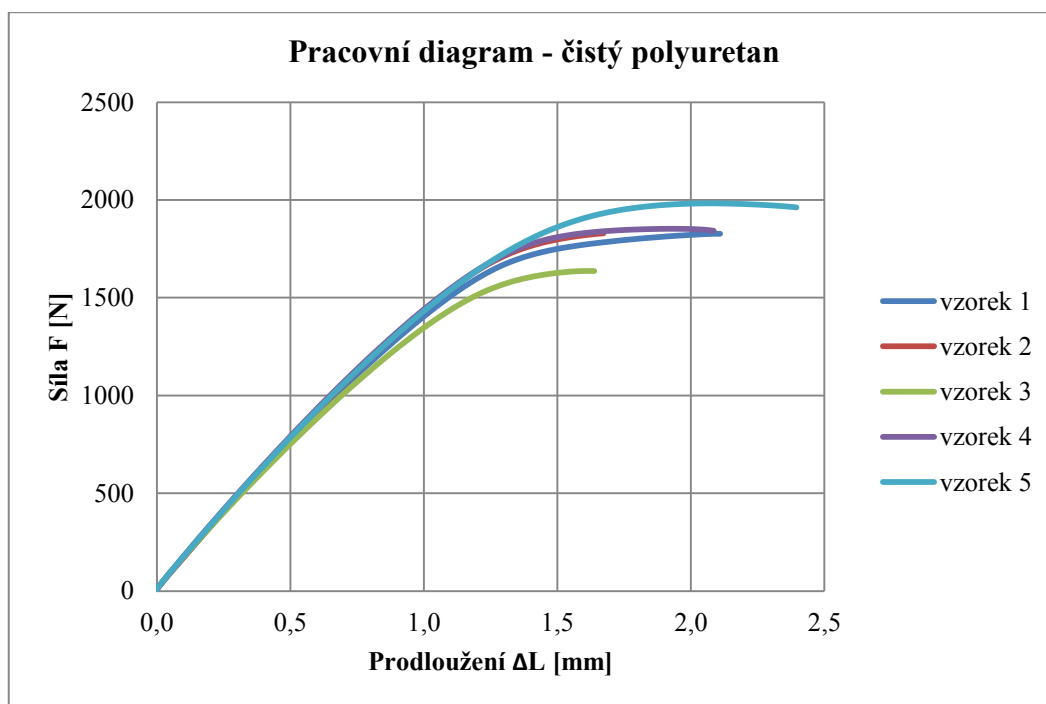
- [1] CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu Sing LIM. NANYANG TECHNOLOGICAL UNIVERSITY. Rapid prototyping: Principles and Applications. 2. vydání. Singapore: World Publishing Co. Pte. Ltd., 2003. ISBN 981-238-120-1 (pbk).
- [2] DAŘOUREK, Karel. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Studijní podklady: Kompozitní materiály* [online]. 2008[cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/KM.htm
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] HAVEL COMPOSITES CZ S.R.O. Havel Composites [online]. 2010 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/>
- [5] HOFMAN, Miroslav. Vhodné materiály pro výrobu prototypů litím ve vakuu. Liberec, 2010. 45 s. Bakalářská práce. Technická univerzita Liberec.
- [6] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity: Vlákná* [online]. 68 s. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [7] LENFELD, Petr. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Technologie II: Zpracování plastů* [online]. 2005 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm
- [8] LIPTÁKOVÁ, Tatiana, Pavol ALEXY, Ernest GONDÁR a Viera KHUNOVÁ. *Polymérne konštrukčné materiály: Odborná publikácia* [online]. 2012 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2009/10/POLYMERY-Po-RECENZII.pdf>
- [9] MACEK, K. a kol. *Strojírenské materiály* [online]. Praha: Vydavatelství ČVUT v Praze, 2003 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://umi.fs.cvut.cz/cs/studium/bakalarske-studium-zs/nauka-o-materialu-ii>
- [10] MCAE SYSTEMS, s.r.o. *3D digitální technologie: Rapid prototyping* [online]. 2014 [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/mk-mini>

- [11] NEZBEDOVÁ, Eva a Ladislav POSPÍŠIL. POLYMER INSTITUTE BRNO. *Vývoj v oblasti kompozitu s částicovým plnivem* [online]. 2011 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/Vyvoj_kompozitu.pdf
- [12] ROTHON, R. *Particulate-filled polymer composites* [online]. 2nd ed. Shrewsbury, UK: Rapra Technology, 2003, [cit. 2014-05-12]. ISBN 978-185-9573-822. Dostupné z: <http://www.google.cz/books?id=4zFY5Yju3TQC>
- [13] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI: KATEDRA MATERIÁLŮ. *Nauka o materiálu II: Kompozity* [online]. 2010 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/NOM2.htm
- [14] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI: KATEDRA MATERIÁLŮ. *Studijní podklady: Nekovové materiály* [online]. 2010 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NEKM/NEM.htm
- [15] TORTEN S.R.O. PR 403 A+B: TECHNICKÝ DATOVÝ LIST. 04/2009.
- [16] WAVIN EKOPLASTIK. 21. mezinárodní odborný veletrh: Mezinárodní odborný veletrh vytápění, ventilační, klimatizační, měřicí, regulační, sanitární a ekologické techniky. *Fiber Basalt Plus: trubky s čedičovým vláknem dobývají svět* [online]. 23. 2. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.aquatherm-praha.com/cz/47.wavin-ekoplastik-hala-5-c-s-522>

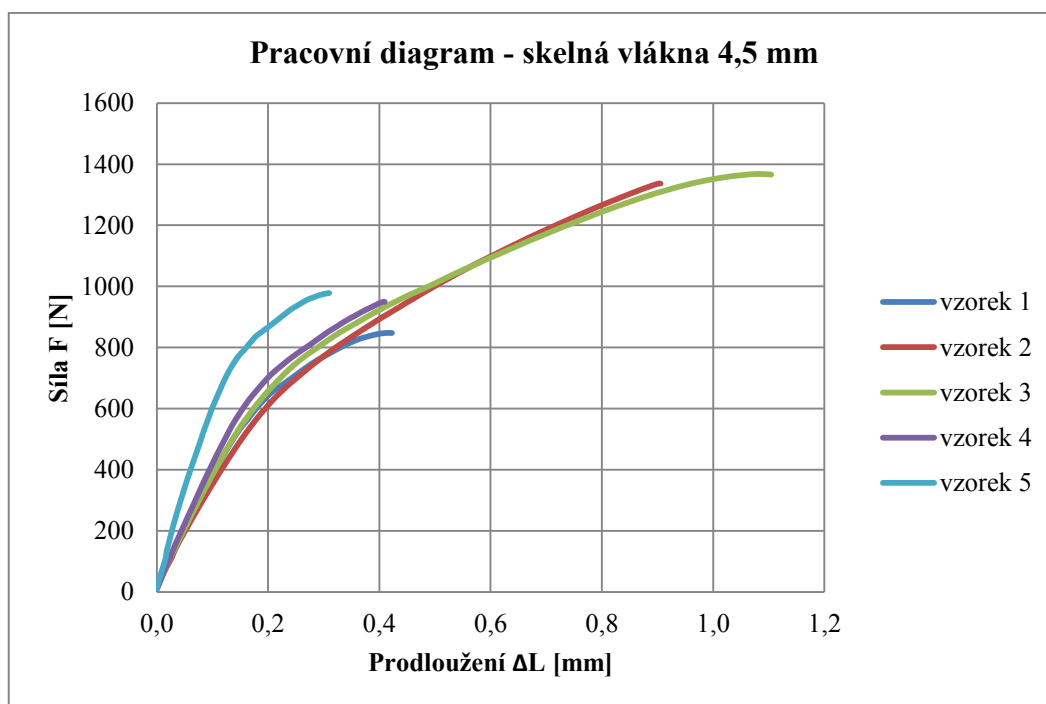
Seznam příloh

Příloha I – Pracovní diagramy ze všech zkoušek v tahu	3 listy
Příloha II – Tabulky celkových hodnot z pevnostní zkoušky v tahu	2 listy
Příloha III – Technický datový list PR 403 A+B	2 listy

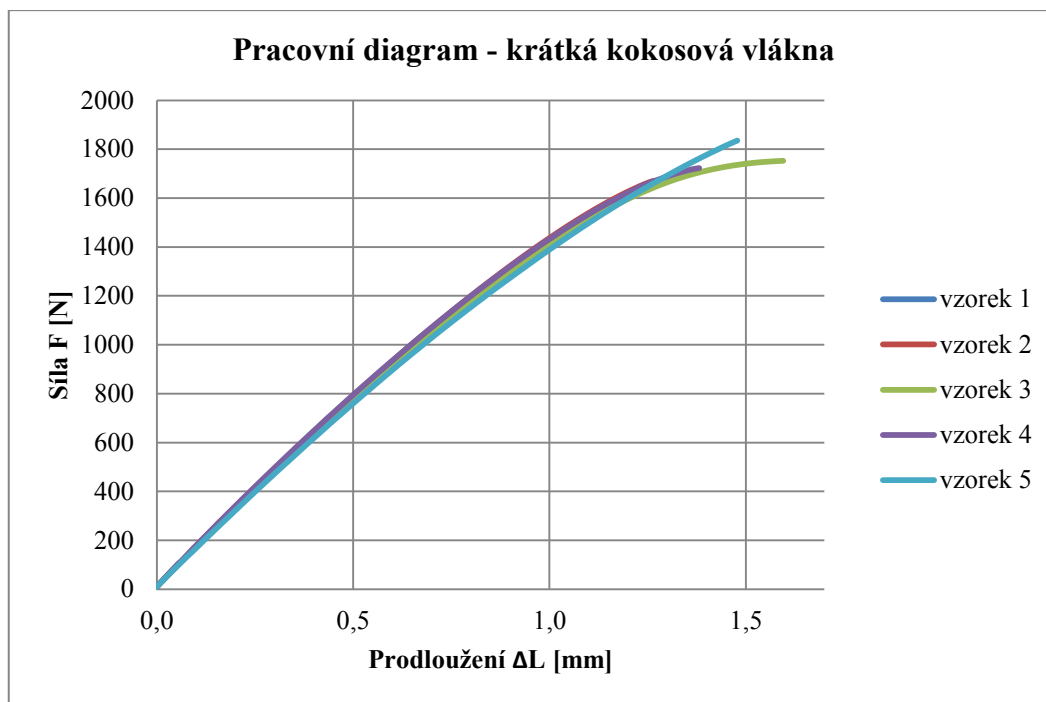
Příloha I – Pracovní diagramy ze všech zkoušek v tahu



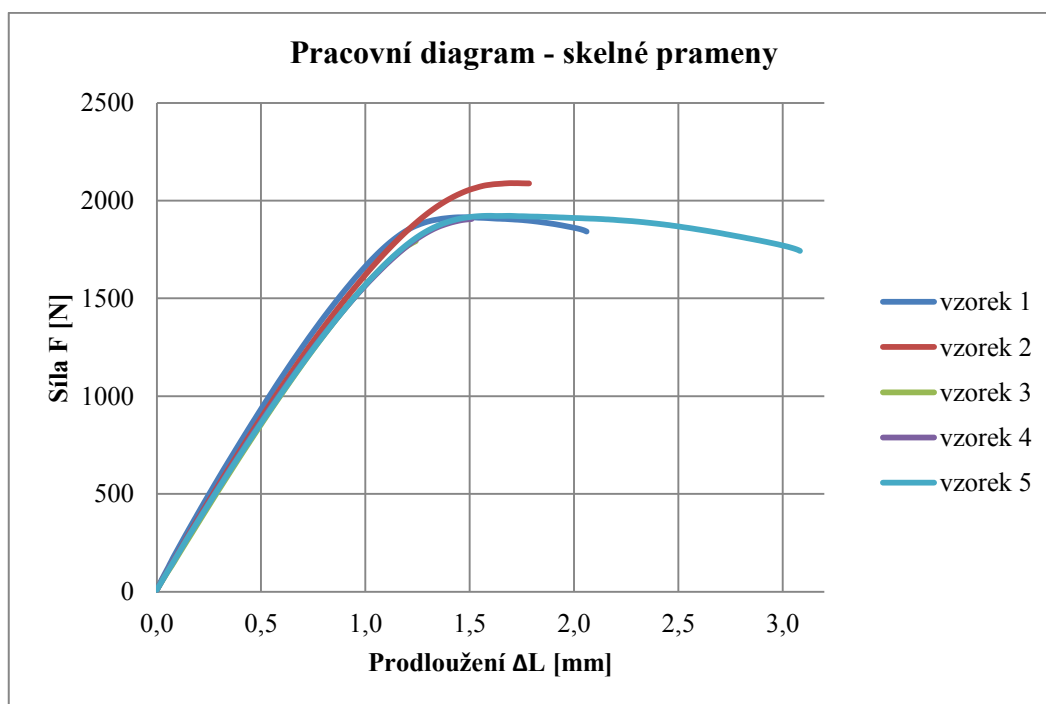
Obr. 1 Čistý polyuretan



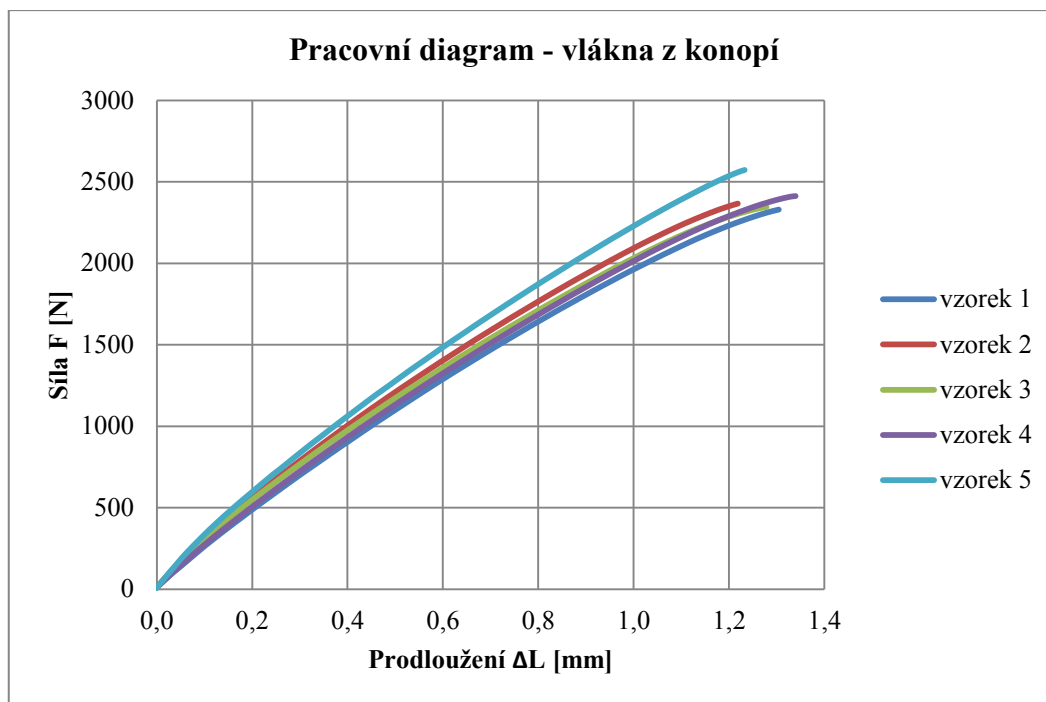
Obr. 2 Skelná vlákna 4,5 mm



Obr. 3 Krátká kokosová vlákna



Obr. 4 Skelné prameny



Obr. 5 Vlákna z konopí

Příloha II – Tabulky celkových hodnot z pevnostní zkoušky v tahu

vzorek	σ_b [MPa]	σ_m [MPa]	ε_b [%]	ε_m [%]	E-modul [MPa]
1	45,68	45,68	4,22	4,19	1919,75
2	45,73	45,73	3,35	3,35	2001,88
3	40,91	40,92	3,28	3,22	2050,25
4	46,06	46,32	4,17	3,84	2029,5
5	49,05	49,57	4,79	4,13	2029,5
průměr	45,49 ± 2,92	45,64 ± 3,09	3,96 ± 0,64	3,75 ± 0,44	2006 ± 51

Tab. 1 Čistý polyuretan

vzorek	σ_b [MPa]	σ_m [MPa]	ε_b [%]	ε_m [%]	E-modul [MPa]
1	21,19	21,19	0,85	0,85	4386,38
2	33,41	33,42	1,81	1,81	4047,37
3	34,15	34,19	2,21	2,18	4407,13
4	21,64	23,75	0,76	0,82	4849,13
5	24,46	24,46	0,62	0,62	6219,13
průměr	26,97 ± 6,35	27,40 ± 5,98	1,25 ± 0,71	1,26 ± 0,69	4782 ± 852

Tab. 2 Skelná vlákna 4,5 mm

vzorek	σ_b [MPa]	σ_m [MPa]	ε_b [%]	ε_m [%]	E-modul [MPa]
1	39,96	39,96	2,39	2,39	2091
2	41,75	41,75	2,53	2,53	2013,63
3	43,81	43,81	3,19	3,19	2032,38
4	43,07	43,07	2,76	2,76	2046,13
5	45,89	45,89	2,96	2,96	1896,88
průměr	42,90 ± 2,22	42,90 ± 2,22	2,77 ± 0,32	2,77 ± 0,32	2016 ± 72

Tab. 3 Krátká kokosová vlákna

vzorek	σ_b [MPa]	σ_m [MPa]	ε_b [%]	ε_m [%]	E-modul [MPa]
1	46,05	47,88	4,12	2,94	2562
2	52,2	52,24	3,57	3,40	2250,5
3	44,82	44,82	2,48	2,48	2142,13
4	47,65	47,65	3,20	3,20	2247,75
5	43,57	48,06	6,17	3,19	2243,5
průměr	46,89 ± 3,35	48,13 ± 2,65	3,91 ± 1,40	3,04 ± 0,35	2289 ± 159

Tab. 4 Skelné prameny

vzorek	σ_b [MPa]	σ_m [MPa]	ε_b [%]	ε_m [%]	E-modul [MPa]
1	58,24	58,24	2,61	2,61	3073
2	59,16	59,16	2,44	2,44	3532,75
3	58,63	58,63	2,56	2,56	3472,13
4	60,32	60,32	2,68	2,68	3247,75
5	64,32	64,32	2,47	2,47	3829,88
průměr	$60,13 \pm 2,47$	$60,13 \pm 2,47$	$2,55 \pm 0,10$	$2,55 \pm 0,10$	3431 ± 288




Tab. 5 Vlákna z konopí

- dvoukomponentní, tekutý licí polyuretanový systém s nízkou viskozitou

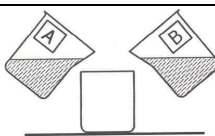


Použití

- ▶ Rapid prototyping, vlastnosti PP, barva bílá
- ▶ E-modul < 1900 MPa
- ▶ teplotní odolnost do 75°C

Základní vlastnosti

Vlastnost/veličina	Jednotka	PR 403A polyol (SH 105 170)	PR 403B isokyanát (SH 115 170)	Směs PR 403 A + B
Barva	-	opakní	opakní	bílá
Zápach		bez zápachu	bez zápachu	bez zápachu
Viskozita dynamická	mPa.s	320	55	160
Hustota	g/cm ³	1,01	1,16	1,10
Symbol nebezpečí		Xn  zdraví škodlivý	Xn  zdraví škodlivý	po vytvrzení 
R-věty		R22, R62 R52/53	R20 R36/37/38 R42/43	-
S-věty		S36/37 S45	S36/37 S45, S23	-
Podmínky skladování		18 – 30°C	18 – 30°C	
Obě komponenty (polyol a isokyanát) jsou citlivé na vlhkost. Je nutno je skladovat na suchém místě v těsně uzavřených originálních obalech výrobce!				

Zpracování

Směšovací poměr komponent	Hmotnostní díly A : B	Objemové díly A : B
	60 : 100	68,9 : 100
Doba zpracovatelnosti po smíchání	5-6 min / 25°C	
		
Doby vytvrzení –	60* min / 25°C 20* min / 70°C	
		
Max. doporučená tl. stěny odlitku	*dle tloušťky stěny odlitku 6 mm	

Postup zpracování

1.Příprava komponent

- minimální doporučená teplota komponent před zpracováním 20°C
- řádné promíchání (homogenizace) komponenty A – polyepoxy i B-izokyanátu
- vakuování komponent

2.Mísení komponent

- řádné, ve směšovací poměru po dobu 30-60s/25°C pod vakuem

3.Doporučená teplota formy

- 35°C = zajištění kvality povrchu odlitku (polyuretan začíná gelovat nejdříve na povrchu, nedochází k tvorbě lunek – vtaženin)

4.Odlévání (optimální)

- do silikonových forem (adiční silikon)

5.Vytvrzení (optimální)

- 20 min/70°C po zgelování směsi ve formě za pokojové nebo mírně zvýšené teploty

6.Následná teplota

- pro dosažení max. teplotní odolnosti: 2hod/70°C + 48hod/25

Vlastnosti po vytvrzení a následné teplotě: 2hod/70°C + 48hod/25°C

Vlastnost	Norma	Jednotka	Hodnota
Hustota		g/cm ³	1,10
Tvrdost		Shore D	74
E-modul pružnosti ze zkoušky ohybem	ISO 178	MPa	1700
Pevnost v ohybu	ISO 178	MPa	65
E-modul pružnosti ze zkoušky tahem	ISO 572	MPa	1850
Protažení do lomu	ISO 572	%	6
Pevnost v tahu	ISO 572	MPa	47
Lineární smrštění při 23°C (mm/m)		mm	2 (tl.vz.3mm)
Rázová pevnost	ISO 179	kJ/m ²	35
Max. doporučená servisní teplota		°C	75

Podmínky skladování

Obě komponenty je nutno skladovat na suchém místě v dobře uzavřených originálních nádobách v teplotním rozmezí 18 – 30°C. Těmto podmínkám odpovídá datum použití uvedené na etiketě obalů.

torten

Naše technické rady pro zpracování materiálů odpovídají dnešnímu stavu našich znalostí. Přesto nezapomínejte na vlastní zkoušky materiálů v souvislosti s Vaším konkrétním použitím, zkušenostmi atd. Vlastní použití materiálů je mimo naši kontrolu a jste za ně plně odpovědní. Zaručujeme bezvadnou kvalitu odpovídající našim všeobecným podmínkám prodeje a dodání.

TORTEN s.r.o.
Holubova 978
547 01 Náchod

Tel./Fax.
00420 491 421 775/ 491 422 012
e-mail:info@torten.cz
www.torten.cz

